

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**OBECNÝ PROGRAM PRO
ENERGETICKÉ VÝPOČTY NAPÁJENÍ TRATÍ
DPMB**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAROSLAV MAI

BRNO 2009

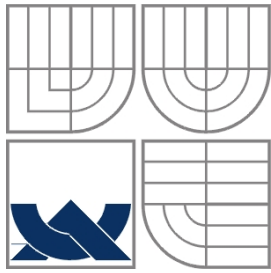
Bibliografická citace práce:

MAI, J. *Obecný program pro energetické výpočty napájení tratí DPMB*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 55 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Antonín Matoušek, CSc.

Prohlašuji, že jsem svou **diplomovou práci** vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Zároveň bych chtěl na tomto místě poděkovat vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Antonínovi Matouškovi, CSc., oponentovi Ing. Jiřímu Šeborovi za rady a připomínky k mé práci, poskytnutou literaturu a svým rodičům za podporu během celé doby mého studia.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

Obecný program pro energetické výpočty napájení tratí DPMB

Jaroslav Mai

vedoucí: doc. Ing. Antonín Matoušek, CSc.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

**Universal computer program for
energy calculations of power supply of
DPMB tracks**

by

Jaroslav Mai

Supervisor: doc. Ing. Antonín Matoušek, CSc.

Brno University of Technology, 2009

Brno

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena, dle zadání od zadavatele, na vytvoření programu v prostředí Excel, který bude umět vypočítat veškeré požadované veličiny.

Tato práce obsahuje čtyři části. První část je zaměřena na problematiku MHD a metody energetických výpočtů. Druhá část obsahuje vývojový diagram a popis programu. Třetí část obsahuje teoretický způsob výpočtů a teoretické porovnání metod. Poslední část obsahuje číselné dosazení a vypočtení hodnot.

KLÍČOVÁ SLOVA: DPMB, tramvaj, trolejbus, měrná spotřeba energie, zkratové proudy, nastavení ochran v napájecí stanici

ABSTRACT

This thesis dwells on program creating in program environment Excel, in accordance with submission from submitter. Program is going to be able solve all required values.

This thesis has four parts. First part is oriented on problems of urban mass transportation a methods of specific energy consumption. Second part contains program flowchart and program description. Third part contains theoretical solution of specific energy consumption and theoretical comparison of computing methods. Last part contains numerical substitution in an equations and calculating of their values.

KEY WORDS: DPMB, tramway, trolley, specific energy consumption, short circuit currents, setting of protection equipment in feeding station

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	12
SEZNAM TABULEK	13
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	14
1 ÚVOD.....	16
2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	17
3 NÁVRH OBECNÉHO PROGRAMU PRO ORIENTAČNÍ VÝPOČET	26
3.1 VÝVOJOVÝ DIAGRAM.....	26
3.2 POPIS PROGRAMU	27
3.3 TEORETICKÝ POSTUP ŘEŠENÍ NÁVRHU NAPÁJENÍ A ZPŮSOB PROVEDENÍ V PROGRAMU	28
3.4 POROVNÁNÍ METOD	35
4 ČÍSELNÉ DOSAZENÍ A POPIS NASTAVENÍ PROGRAMU	38
4.1 ZADÁNÍ VÝPOČTU.....	38
4.2 KONTROLNÍ VÝPOČET	38
4.3 POROVNÁNÍ METOD	48
4.4 TABULKY VYPOČTENÝCH HODNOT.....	51
5 ZÁVĚR.....	52
POUŽITÁ LITERATURA	53
PŘÍLOHA A PARAMETRY VOZŮ U DPMB.....	54
PŘÍLOHA B PARAMETRY POTŘEBNÉ K VÝPOČTU NAPÁJENÍ	55

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3-1 Vývojový diagram programu.....	26
Obr. 4-1 Zobrazení výpočtu položky „Počet vlaků současně v úseku“ v Excelu.....	39
Obr. 4-2 Zobrazení výpočtu položky „Počet vlaků v úseku za 1 hodinu oběma směry“ v Excelu.....	39
Obr. 4-3 Zobrazení výpočtu položky „Celkový odpor napájecí části“ v Excelu	40
Obr. 4-4 Zobrazení výpočtu položky „Celkový odpor zpětné části“ v Excelu.....	40
Obr. 4-5 Zobrazení výpočtu položky „Odpor měničny“ v Excelu.....	41
Obr. 4-6 Zobrazení výpočtu položky „Celkový odpor“ v Excelu.....	41
Obr. 4-7 Zobrazení výpočtu položky „Výpočet poměrného jízdního odporu“ v Excelu.....	42
Obr. 4-8 Zobrazení výpočtu položky „Výpočet rozjezdových a brzdných ztrát“ v Excelu	42
Obr. 4-9 Zobrazení výpočtu položky „Výpočet rozjezdových a brzdných ztrát“ v Excelu	43
Obr. 4-10 Zobrazení výpočtu položky „Výpočet rozjezdových a brzdných ztrát“ v Excelu	43
Obr. 4-11 Zobrazení výpočtu položky „Střední proud I_a “ v Excelu	44
Obr. 4-12 Zobrazení výpočtu položky „Maximální proud I_{max} “ v Excelu.....	44
Obr. 4-13 Zobrazení výpočtu položky „Nastavení nadproudové ochrany“ v Excelu	45
Obr. 4-14 Zobrazení výpočtu položky „Minimální zkratová proud I_{kmin} “ v Excelu.....	45
Obr. 4-15 Zobrazení výpočtu položky „Nastavení zkratové ochrany“ v Excelu.....	46
Obr. 4-16 Zobrazení výpočtu položky „1. podmínka nerovnosti“ v Excelu.....	46
Obr. 4-17 Zobrazení výpočtu položky „2. podmínka“ v Excelu	46
Obr. 4-18 Zobrazení výpočtu položky „Úbytek napětí“ v Excelu.....	47
Obr. 4-19 Zobrazení výpočtu položky „Povolený úbytek napětí“ v Excelu.....	47
Obr. 4-20 Zobrazení výpočtu položky „Povolený úbytek napětí“ v Excelu.....	47
Obr. 4-21 Zobrazení výpočtu „Výpočet poměrného jízdního odporu“ v Excelu pro porovnání...	48
Obr. 4-22 Zobrazení výpočet „Výpočet spotřeby energie podle [1.1]“ v Excelu pro porovnání..	48
Obr. 4-23 Zobrazení výpočtu „Výpočet Rozjezdových a brzdných ztrát podle [1.2]“ v Excelu pro porovnání.....	49
Obr. 4-24 Zobrazení výpočtu „Výpočet spotřeby energie podle [1.2]“ v Excelu pro porovnání..	49
Obr. 4-25 Zobrazení výpočtu „Výpočet Rozjezdových a brzdných ztrát podle [1.3]“ v Excelu pro porovnání.....	49
Obr. 4-26 Zobrazení výpočtu „Výpočet spotřeby energie podle [1.3]“ v Excelu pro porovnání..	50
Obr. 4-27 Zobrazení výpočtu „Výpočet Rozjezdových spotřeby energie“ v Excelu pro porovnání	50
Obr. 4-28 Zobrazení výpočtu „Výpočet chyby výpočtu“ v Excelu pro porovnání.....	50

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Celková dispozice tramvajové tratě.....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2-2 Vypočítané hodnoty měrné spotřeby podle [1.1].....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2-3 Vypočítané hodnoty měrné spotřeby a el. energie podle [1.2].....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 2-4 Vypočítané hodnoty měrné spotřeby a el. energie podle [1.3].....</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 2-5 Naměřené hodnoty spotřeby el.energie</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 2-6 Procentní chyby mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami spotřeby el.energie</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 2-7 Spotřeba el.energie podle [1]s respektováním počtu zastavení N.....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 2-8 Spotřeba el.energie podle [3]s respektováním počtu zastavení N.....</i>	<i>25</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Veličina	Značka jednotky
A	vypočtená spotřeba energie	Wh
A _s	skutečná spotřeba energie	Wh
I _{ef}	proud odebíraný 1 vozem v daném úseku	A
I _a	střední proud	A
I _{max}	maximální proud	A
I _n	jmenovitý proud nejmenší usměrňovací jednotky měnírny	A
I _p	proud pomocných pohonů	A
L	délka úseku	km
N	počet zastavení v úseku	1
R _C	celkový odpor	Ω
R _M	odpor měnírny	Ω
R _N	odpor napájecí části	Ω
R _Z	odpor zpětné části	Ω
S	čelní plocha tramvaje(9m ²)	m ²
U ₀	napětí naprázdno	V
U _n	napětí jmenovité	V
c _e	koeficient efektivního proudu	1
int	interval jednotného vozu	min
koef(a)	nadproudový koeficient pro ochrany	1
koef(b)	koeficient zkratového proudu pro ochrany	1
koef(c)	koeficient zkratového proudu	1
l _k	délka kabelů	km
n	počet vlaků současně v úseku	1
n'	počet vlaků v daném úseku za 1 hodinu oběma směry	1
n _k	počet paralelně řazených kabelů	1
m	hmotnost (24,5t)	t
p ₀	měrný jízdní odpor	Wh.t ⁻¹
p _s	měrný odpor ze stoupání	N/kN
s	průměrná vzdálenost zastávek	km
v=v _c	rychlost, cestovní rychlost	km.h ⁻¹
v _r =v _b	rozjezdová (zábrzdá) rychlost	km.h ⁻¹

Značka	Veličina	Značka jednotky
w	měrná spotřeba elektrické energie	Wh.(tkm) ⁻¹
w ₀	měrná spotřeba elektrické energie na konání trakční práce	Wh.(tkm) ⁻¹
w _r	měrná spotřeba elektrické energie pro rozjezd a brzdění	Wh.(tkm) ⁻¹
z	rozjezdové a brzdné ztráty	Wh.t ⁻¹
$\frac{m}{P_n}$	zatížení na jednu nápravu	t
ΔU	dovolený úbytek napětí	V
δ	odchylka, chyba	%
ρ	resistivita, měrný odpor	Ω/km
ε	koeficient respektující účinnost tramvaje	1
ξ	součinitel rotačních hmot	1
η _v	účinnost vozidla	1
η _T	účinnost oporového spouštění	1
η _c	celková účinnost vozidla	1

1 ÚVOD

Diplomová práce seznámí čtenáře s všeobecným rozdělením MHD a jinými aspekty týkající se MHD. Práce je zaměřena na výpočet spotřeby energie provozem tramvajové či trolejbusové trati a také se zaměřuje na výpočet parametrů pro nastavení proudových ochran.

Pro provedení výpočtu spotřeby elektrické energie jsou uvedeny tři různé metody, které jsou uvedeny s důležitými vztahy pro požadované výpočty a jejich porovnání provedené v Bratislavě.

Zadání práce předpokládá návrh obecného programu pro energetické výpočty napájení tratí Dopravního Podniku města Brna, bude zpracován vývojový diagram, podle kterého program pracuje. Při návrhu programu bude popsáno především grafické rozdělení a postup výpočtu vychází z požadavků pracovníků Dopravního Podniku města Brna.

Poslední částí energetických výpočtů určitého úseku je číselný výpočet spotřeby elektrické energie, proudů, které mohou za provozu či poruše (zkratu) namáhat napájecí stanici a porovnání metod na daném úseku, pro který je prováděn energetický výpočet.

Městská doprava je hromadná doprava osob v území velkého města a jeho nejbližšího okolí, tvořící zájmovou oblast obyvatel města.

Hromadná městská doprava je společensky a hospodářsky důležitým činitelem ve vzájemných vztazích hospodářských, politických, kulturních a sociálních mezi obyvateli velkého města.

Hromadná městská doprava může být provozována dopravními prostředky:

- kolejovou pouliční dráhou,
- trolejbusovou pouliční dráhou,
- autobusy,
- městskou rychlou dráhou,
- podzemní dráhou,
- městskými nadzemními drahami
- městskými lanovkami.

Městská doprava má tvořit jeden dopravní systém, který v celé zájmové oblasti svojí dopravní výkonností odpovídá přepravní potřebě, ať je řešen kterýmkoliv ze zmíněných dopravních prostředků.

Městská doprava je převážně přepravou osob do zaměstnání. Vlivem společné pracovní doby na podnicích a v různých pracovních odvětvích vznikají během dne přepravní špičky, které se ostatně objevují sezónně i ve dnech pracovního klidu vlivem přepravy za rekreací nebo při hromadných podnicích sportovních, příležitostních apod.

Sjednocení pracovní doby v průmyslových závodech, úřadech a školách způsobuje ostré dopravní špičky trávající sotva 2 hodiny. Polední špička, dříve taktéž dosti silná se stále zmenšuje

hlavně vlivem jednoduché pracovní frekvence a vlivem společného stravování v poledne poblíž pracoviště. Odpolední přeprava ze zaměstnání se rozkládá již příznivěji, neboť se pracující nevrací ve stejný čas a používají zpáteční cesty k nákupu, rekreaci, zábavě, apod. Poněkud silněji vyjádřená je u nás večerní špička.

Dopravní špičky se stávají u nás i v cizině, kde jsou i silné polední špičky vážným problémem, který ohrožuje bezpečnost a plynulost dopravy a způsobuje velké morální i materiální škody. Tomuto nebezpečí lze čelit odstupňováním pracovní doby, které musí být široce organizováno a musí být ukázněně dodržováno, což nelze kontrolovat. Proto bylo velké úsilí o odstupňování pracovní doby jen málo úspěšné. Na spojovacích tepnách mezi sídlišti a výrobními závody, případně správními centry, přesahují dopravní špičky 2,5 násobkem průměrného denního zatížení.

V mezidobí špiček se však musí z důvodu služby obyvatelstvu udržovat doprava v přiměřených intervalech, která se může stát pak nehospodárnou.

Spotřeba elektrické energie tramvají

Městská hromadná doprava je nejkapacitnějším systémem naší dopravní soustavy se stále stoupajícím trendem, představujícím roční nárůst průměrně o 2% počtu přepravovaných osob.

Vzhledem k energetické náročnosti MHD je vždy třeba stanovit spotřebu elektrické energie pro jednotlivé tramvajové linky, která je výchozím podkladem pro dimenzování trakčních měníren a elektrických zařízení sloužících k rozvodu trakčního proudu.

Cílem diplomové práce je vytvořit program obecně platný pro městské trakční sítě, který umí stanovit okamžitou měrnou spotřebu elektrické energie a provést výpočet nastavení zkratových ochran v jednotlivých úsecích.

2 CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Teoretické stanovení spotřeby elektrické energie

Energetický výpočet musí být neoddělitelnou součástí nejen každého projektu výstavby nové nebo rekonstrukce staré tratě, ale musí se provádět i při provozních změnách počtu vozidel na trati, aby mohl být zajištěn bezpečný a spolehlivý provoz při přechodných zvýšených provozních nárocích na odběr trakčního proudu.

Protože se projektováním energetických zařízení MHD zabývají různé organizace, projevuje se v základních výpočtech značná nejednotnost, způsobená používáním různých podkladů z odborné literatury.

Důležitým údajem o energetické náročnosti MHD je spotřeba elektrické energie, kterou lze rovněž vypočítat několika způsoby se značně rozdílnými výsledky. Jedinou možností, jak stanovit přesnost výpočetních vztahů, je vzájemně porovnat vypočtené a skutečné naměřené hodnoty spotřeby elektrické energie pro určitou tramvajovou trať a tak zjistit odchylku ve výpočtu.

Výpočet spotřeby elektrické energie se provádí na základě stanovení měrné spotřeby w , která je dána součtem měrné spotřeby na konání trakční práce w_s a měrné spotřeby pro rozjezd a brzdění w_r , měrná spotřeba pomocných pohonů se v tomto případě neuvažuje. Ve sledovaných publikacích se udávají tyto vztahy pro výpočet jednotlivých složek měrné spotřeby:

Literatura [1.1]

Měrná spotřeba na konání trakční práce

$$w_0 = 2,72 \cdot \frac{P_0 \pm P_s}{\eta_v} \text{ (Wh/tkm)} \quad (2.1)$$

Měrná spotřeba pro rozjezd a brzdění

$$w_r = 1,072 \cdot 10^{-2} \cdot \xi \cdot v_r^2 \cdot \frac{N}{L} \cdot \frac{1}{\eta_T} \text{ (Wh/tkm)} \quad (2.2)$$

Literatura [1.2]

Měrná spotřeba na konání trakční práce

$$w_0 = \left[2,72 \cdot (p_0 \pm p_s) + \frac{z}{s} \right] \cdot \frac{1}{\eta_c} \text{ (Wh/tkm)} \quad (2.3)$$

Rozjezdové a brzdové ztráty

$$z = 1,072 \cdot 10^{-2} \cdot \xi \cdot v_r^2 \cdot \varepsilon \text{ (Wh/t)} \quad (2.4)$$

Literatura [1.3]

Měrná spotřeba na konání trakční práce

$$w_0 = \left[2,72 \cdot (p_0 \pm p_s) + \frac{z}{l} \right] \cdot \frac{1}{\eta_c} \text{ (Wh/tkm)} \quad (2.5)$$

Rozjezdové a brzdové ztráty

$$z = 1,072 \cdot 10^{-2} \cdot \xi \cdot v_r^2 \cdot \varepsilon \cdot N \text{ (Wh/t)} \quad (2.6)$$

Další použité výpočtové vztahy:

Měrný jízdní odpor

$$p_0 = 3,65 + \frac{14,5}{m/P_n} + 0,045 \cdot v + \frac{44 \cdot S \cdot v^2}{m} \cdot 10^{-4} \text{ (N/kN)} \quad (2.7)$$

Měrná spotřeba energie

$$A = w \cdot m \cdot L \text{ (W.h)} \quad (2.8)$$

Použité značky

Značka	Veličina	Značka jednotky
L	délka úseku	km
N	počet zastavení v úseku	1
S	čelní plocha tramvaje(9m ²)	m ²
m/P _n	zatížení na jednu nápravu	t
m	hmotnost (24,5t)	t
p _s	měrný odpor ze stoupání	N/kN
s	průměrná vzdálenost zastávek	km
v	rychlost	km.h ⁻¹
v _r =v _b	rozjezdová (zábrzdňá) rychlost (25 km.h ⁻¹)	km.h ⁻¹
ξ	součinitel rotačních hmot (1,25)	1
η _v	účinnost vozidla (0,8)	1
η _T	účinnost oporového spouštění (0,45)	1
η _c	celková účinnost vozidla (0,69)	1
ε	koeficient respektující účinnost tramvaje	1
	ε=1,3 v centru města – podle údajů DPm Prahy	
	ε=1,7 na předměstí – podle údajů DPm Prahy	
	ε=1,7 – podle údajů SÚDOP Brno	

V tabulkách jsou uvedeny vypočítané hodnoty měrné spotřeby a elektrické energie

Tab. 2-1 Celková dispozice tramvajové tratě

Číslo nap. úseku	L	N	s	p		Zastávka
	[km]	[-]	[km]	směr Ružinov	směr Hl. nádraží	
				[‰]	[‰]	
1	0,475	2	0,237	-20	20	Hlavní nádraží
2	0,590	2	0,590	-20	20	Dimitrovovo náměstí
3	0,785	2	0,785	-20	20	Radlinského ulice
4	0,750	2	0,750	0	0	Avion
5	0,580	2	0,580	0	0	Szabova ulice
6	0,755	4	0,755	0	0	Steinerův pivovar
7	0,600	1	0,600	0	0	Pozemní stavby
8	0,900	2	0,450	0	0	Salvová ulice
9	0,700	3	0,700	0	0	Komárnická ulice
10	0,800	3	0,400	0	0	Vihorlat
11	0,560	2	0,280	0	0	Súmračná ulice - Ružinov konečná

Tab. 2-2 Vypočítané hodnoty měrné spotřeby podle [1.1]

Číslo nap. úseku	W ₀		W _r	w		A	
	[Wh/tkm]		[Wh/tkm]	[Wh/tkm]		[W.h]	
	směr Ružinov	směr Hl. nádraží		směr Ružinov	směr Hl. nádraží	směr Ružinov	směr Hl. nádraží
1	0	100,54	78,35	78,35	178,89	911,79	2081,83
2	0	100,54	63,80	63,08	163,62	911,82	2365,12
3	0	100,54	47,41	47,41	147,95	906,00	2845,45
4	32,54		74,44	106,98		1965,76	
5	32,54		64,17	96,71		1374,25	
6	32,54		98,59	131,13		2425,60	
7	32,54		31,02	63,56		934,33	
8	32,54		41,35	73,90		1629,49	
9	32,54		79,76	112,30		1925,94	
10	32,54		69,78	102,53		2005,47	
11	32,54		66,46	99,00		1358,33	

Tab. 2-3 Vypočítané hodnoty měrné spotřeby a el. energie podle [1.2]

číslo nap. úseku	ε	w		A	
	[Wh/tkm]	[Wh/tkm]		[W.h]	
		směr Ružinov	směr Hl. nádraží	směr Ružinov	směr Hl. nádraží
1	1,7	86,88	203,46	1011,06	2367,76
2	1,7	34,97	151,54	505,49	2190,50
3	1,3	20,10	136,67	385,57	2628,50
4	1,3	58,77		1079,90	
5	1,3	64,04		922,80	
6	1,3	58,63		1084,50	
7	1,3	64,02		941,09	
8	1,7	83,15		1833,76	
9	1,7	67,21		1152,65	
10	1,7	89,33		1750,87	
11	1,7	67,95		932,27	

Tab. 2-4 Vypočítané hodnoty měrné spotřeby a el. energie podle [1.3]

číslo nap. úseku	w		A	
	[Wh/tkm]		[W.h]	
	směr Ružinov	směr Hl. nádraží	směr Ružinov	směr Hl. nádraží
1	87,12	204,03	1013,88	2374,40
2	70,14	187,06	1013,95	2703,95
3	52,72	169,63	1013,90	3262,40
4	120,62		2216,39	
5	109,19		1551,58	
6	147,48		2728,01	
7	72,33		1063,25	
8	73,83		1848,45	
9	126,53		2170,07	
10	115,46		2263,02	
11	111,75		1533,21	

Tab. 2-5 Naměřené hodnoty spotřeby el.energie

číslo nap. úseku	L	A _s	A _s
	[km]	[W.h] směr Ružinov	[W.h] směr Hl. nádraží
1	0,475	701,51	2884,90
2	0,590	871,35	3583,41
3	0,780	1159,34	4767,76
4	0,750	2223,93	2394,77
5	0,580	1970,90	2131,75
6	0,755	2763,84	2857,09
7	0,600	1712,74	1747,47
8	0,900	2569,11	2621,20
9	0,700	1998,20	2038,72
10	0,800	2283,67	2329,76
11	0,560	1598,56	1630,97

Výsledky měření spotřeby elektrické energie

Skutečná spotřeba elektrické energie byla sledována na tramvajové trati DPm Bratislavy spojující Hlavní nádraží se sídlištěm Ružinov. Tramvajová trať je dvojkolejná, vede nastaveným územím na vlastním tělese, trolejové vedení je zavěšeno na stožárech umístěných ve středu tělesa, terén rovinný, trať o délce 7,495km má 11 napájecích úseků napájených ze tří měření.

Měření měrné spotřeby elektrické energie tramvajů bylo provedeno Státní energetickou inspekcí ve spolupráci s DPm Bratislavy s cílem stanovení energetické náročnosti tramvaje typu T3 s odporovou regulací při městském provozu a běžných podmínkách, tj. s průměrnou zátěží 8t a zastavováním ve stanicích podle jízdního řádu městské dopravy. Registrační měřící wattmetr zaznamenal okamžité hodnoty trakčního výkonu bez spotřeby pomocných pohonů. Do úvahy nebyla brána ani spotřeba při jízdě na manipulačních kolejích a ve smyčkách konečných stanic. Výsledky uvádí tab.2-5.

Přesnost teoretických vztahů pro spotřeby elektrické energie byla určena pomocí procentní chyby mezi vypočítanou A a skutečnou změřenou hodnotou A_s.

$$\delta = \frac{A - A_s}{A_s} \cdot 100 (\%) \quad (2.9)$$

Procentní chyby teoretických vztahů pro výpočet spotřeby elektrické energie podle literatury [1.1], [1.2] a [1.3] jsou provedeny v tab.2-6.

Z tab.2-6. vyplývá, že mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami jsou značné rozdíly, přičemž skutečně naměřená spotřeba elektrické energie je podstatně vyšší. Protože největší nepřesnost vykazují výpočetní vztahy podle [1.2], není s nimi dále uvažováno.

Vzhledem k velkým procentním chybám mezi vypočítanými a naměřenými hodnotami bylo na dané tramvajové trati provedeno ověření počtu zastavení v úseku (veličina N v tab.1). Trať byla projeta třikrát z toho dvakrát v čase dopravního sedla a jednou ve špičce. Počet zastavení N_1 byl pak stanoven jako průměr ze součtu brzdění, rozjezdů, a neúplných nášlapů na jednotlivých úsecích při kontrolních jízdách. S respektováním takto zjištěného přesnějšího počtu zastavení N_1 byla znovu vypočítána spotřeba energie podle [1.1] a [1.3]. Výsledky přepočtu pro oba směry jízdy včetně procentní chyby udávají tab.2-7 a tab.2-8. Z porovnání z tab.2-7 a tab.2-8 jednoznačně vyplývá, že k teoretickému výpočtu spotřeby elektrické energie je nevhodnější používat vztahy podle literatury [1.3], kdy procentní chyby mezi vypočítanými a skutečně naměřenými hodnotami spotřeby elektrické energie na tramvajových tratích jsou menší.

Tab. 2-6 Procentní chyby mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami spotřeby el.energie

Číslo nap. úseku	-1-		-2-		-3-	
	δ	δ	δ	δ	δ	δ
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
	směr Ružinov	směr Hl. nádraží	směr Ružinov	směr Hl. nádraží	směr Ružinov	směr Hl. nádraží
1	27,97	-27,97	44,10	-17,90	44,53	-17,89
2	4,64	-33,90	-41,98	-38,87	16,36	-24,54
3	-21,85	-40,42	-66,65	-44,87	-12,54	-21,57
4	-11,60	-17,90	-51,44	-54,90	-0,30	-7,40
5	-30,27	-35,53	-53,20	-56,71	-21,30	-27,21
6	-12,23	-15,10	-60,76	-62,04	-1,30	-4,52
7	-45,45	-46,53	-45,05	-46,14	-37,92	-39,15
8	-36,57	-37,83	-28,63	30,05	-28,05	-29,48
9	-3,62	-5,53	-42,31	-43,46	8,60	6,44
10	-12,18	-13,83	-23,33	-24,85	-0,90	-2,87
11	-15,03	-16,72	-41,68	-42,84	-4,09	-5,99
Průměrná chyba	-14,19	-26,46	-37,30	-42,06	-3,35	-16,73
Průměrná chyba výpočtu	-20,32		-39,68		-10,04	

Tab. 2-7 Spotřeba el.energie podle [1]s respektováním počtu zastavení N

Číslo nap. úseku	N	A	δ	N	A	δ
	[-]	[W.h]	[%]	[-]	[W.h]	[%]
	směr Ružinov			směr Hlavní nádraží		
1	1,399	637,85	-9,07	3,099	2582,94	-10,47
2	1,833	835,79	-4,08	4,090	3318,14	-7,40
3	2,290	1044,13	-9,93	4,230	3862,27	-18,99
4	3,230	2070,68	6,89	3,126	2023,27	-15,51
5	3,000	1830,25	-7,14	2,900	1784,60	-16,28
6	4,566	2683,80	2,89	4,866	2820,50	-1,28
7	2,366	1557,02	9,08	2,566	1648,31	-5,74
8	3,360	2249,54	-12,44	3,266	2206,54	-15,82
9	2,560	1725,29	-13,66	2,693	1785,83	-12,40
10	3,030	2019,19	-11,58	3,130	2064,86	-11,38
11	2,130	1417,55	-11,32	2,266	1479,56	-9,30
Průměrná chyba	-8,92			-11,32		
Průměrná chyba vztahu	-10,12					

Tab. 2-8 Spotřeba el.energie podle [3]s respektováním počtu zastavení N

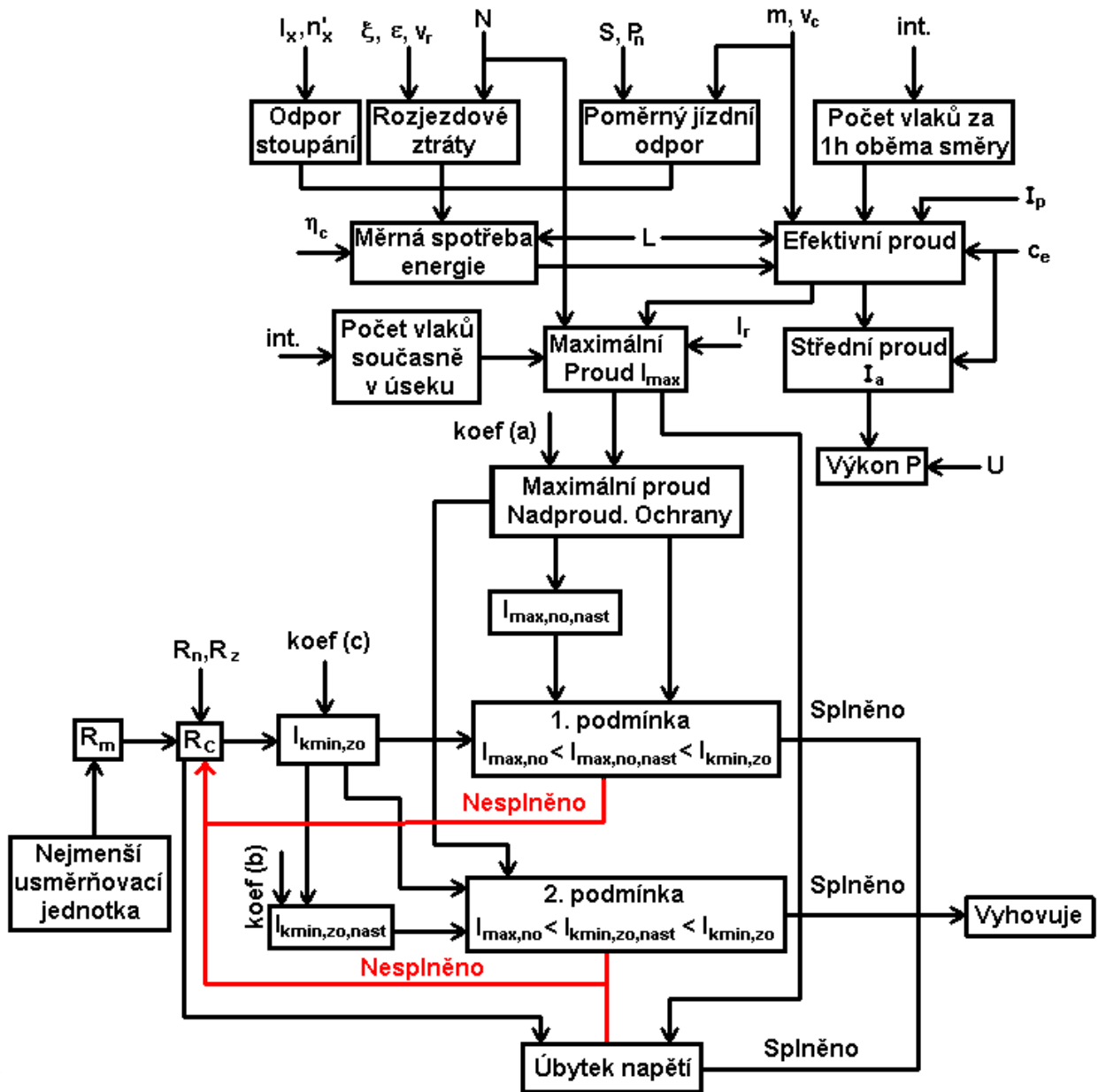
Číslo nap. úseku	N	A	δ	N	A	δ
	[-]	[W.h]	[%]	[-]	[W.h]	[%]
	směr Ružinov			směr Hlavní nádraží		
1	1,399	709,24	1,10	3,099	2931,10	1,62
2	1,833	929,28	6,65	4,090	3763,67	5,30
3	2,290	1166,26	0,60	4,230	4393,17	-7,86
4	3,230	2333,09	2,32	3,126	2280,20	-4,78
5	3,000	2058,71	4,45	2,900	2008,11	-5,80
6	4,566	3014,87	9,08	4,866	3167,04	10,84
7	2,366	1755,79	2,51	2,566	1857,28	6,28
8	3,360	2537,86	-1,22	3,266	2490,42	-4,99
9	2,560	1946,97	-2,56	2,693	2014,27	-1,20
10	3,030	2277,81	-0,25	3,130	2328,52	-0,06
11	2,130	1599,05	0,03	2,266	1668,05	2,27
Průměrná chyba	2,06			0,15		
Průměrná chyba vztahu	1,1					

Závěr

Složkové metody výpočtů spotřeby elektrické energie jsou méně přesné, rozdíly proti skutečné potřebě činí $\pm 10 \div 20\%$ vypočítané spotřeby. Postačují ale pro dimenzování pevných trakčních zařízení, kde se při výkonovém dimenzování uvažuje vždy s určitou rezervou, větší než je přesnost těchto metod. Zatímco výpočtové vztahy podle [1.1] a [1.3] odpovídají těmto předpokladům, používání podkladů z [1.2] pro jejich příliš velkou nepřesnost je problematické.

3 NÁVRH OBEČNÉHO PROGRAMU PRO ORIENTAČNÍ VÝPOČET

3.1 Vývojový diagram



Obr. 3-1 Vývojový diagram programu

3.2 Popis programu

Program pro energetický výpočet MHD je podle zadání vytvořen v prostředí Microsoft Office Excel.

Program se skládá ze čtyř záložek, které jsou pojmenovány jako Rozhraní, Tabulkové hodnoty, Výpočty a poslední záložkou je Porovnání.

Program je řešen tak, aby bylo možno „přepínat“ mezi různými hodnotami dle potřeby, a nemusely se vyhledávat či zapisovat, použitím funkce logické jedničky a nuly, tedy zapnuto a vypnuto. Tyto funkce jsou pak kontrolovány na správné zadání, které se ukáže vedle tabulky, pro případ, že došlo k zadání více hodnot ve stejné kategorii či neúmyslnému přepsání jiného prvku potřebného ke správné funkci programu.

Buňky tabulek jsou barevně odlišeny, aby bylo poznat, které hodnoty můžeme dle potřeby a uvážení měnit (zelená barva buňky tabulky), které není dobré měnit (oranžová barva buňky), ovšem jejich změna může, ale nemusí mít vliv na vypočtené hodnoty, což závisí na dané záložce. Posledním barevným rozdělením buněk je světlé modrá, která slouží jako indikace hodnot, které jsou použity ve výpočtech a mají hodnotu právě zvolených buněk v jejich kategorii, čímž je lze použít jako kontrola správnosti použitých hodnot.

Záložka Rozhraní je tvořena třemi tabulkami a slouží zejména jako záložka pro zadávání hodnot pro výpočty a zobrazování požadovaných výsledných hodnot. Ze tří tabulek jsou dvě kopiemi tabulky v záložce „Výpočty“. Tabulky jsou pojmenované jako Parametry úseku a Další parametry.

Do první tabulky „Parametry úseku“ zapisujeme hodnoty veličin potřebné pro výpočet. Do tabulky „Parametry úseku“ zapisujeme Délka úseku, Počet zastavení v úseku, Průměrná vzdálenost zastávek s a Sklon trati.

V tabulce Zadávané parametry zapisujeme hodnotu veličiny „Délka úseku“ pouze celou délku úseku. V případě nutnosti použití redukované délky, je třeba použít vzorec v záložce Výpočty, do kterého je třeba správně doplnit potřebné informace se zvážením řešené situace, proto nebyla vytvořena pro tyto hodnoty tabulka. Nastavením zeleného políčka u celkové délky úseku na hodnotu „nula“ aktivujeme výpočet redukované délky. V původním nastavení je políčko nastaveno na hodnotu „jedna“, čímž je použita hodnota celkové délky.

Hodnoty veličin „Počet zastavení v úseku“ a „Průměrná vzdálenost zastávek s “ nemá přepínání pomocí jedničky a nuly, jelikož není třeba, protože se jedná pouze o veličiny, kterou musíme zadávat.

Hodnota veličiny „Sklon trati“ lze zadat jako jedno číslo do prvního řádku, který umožňuje vypočítat celkový sklon úseku, pokud je to potřeba.

Tabulka „Další parametry“ obsahuje všechny potřebné tabulkové hodnoty, které použijeme pro výpočet spotřeby energie a pro výpočet parametrů nastavení proudových ochran. Jsou zde uvedeny následující veličiny: Počet kabelů a délka kabelu mezi napájecí stanicí a tratí, Jmenovitý proud nejmenší usměrňovací jednotky, rychlost (též nazývaná cestovní rychlost), Interval jednotného typu, Koeficient respektující účinnost tramvaje, Hmotnost vozidla, Počet náprav daného typu vozidla, Rozjezdový proud jednotného typu a proud pomocných pohonů a Proudové koeficienty. Hodnoty uvedených veličin jsou zapsány v Příloze A a Příloze B.

Záložka „Tabulkové hodnoty“, jak již napovídá název samotné záložky, obsahuje veškeré konstantní hodnoty, které jsou pro správný chod veškerých výpočtů důležité, slouží tedy jako databáze a neobsahuje žádné zvláštní úpravy, které by se projevovaly ve výpočtech.

Jádrem programu pro výpočet spotřeby a parametrů nastavení proudových ochran je záložka „Výpočty“. Tato záložka obsahuje tabulky „Zadávané parametry úseku“ a „Další parametry“. Obsahově jsou tabulky v záložkách „Rozhraní“ a „Výpočty“ totožné. Některé hodnoty jsou sem převedeny ze záložky „Rozhraní“, jiné pak ze záložky „Tabulkové hodnoty“. Vedle tabulek je vytvořeno jádro programu, které se skládá z postupu, který je uveden v kapitole 4.2 Teoretický postup řešení návrhu napájení, ve formě číselně dosazených veličin ve vzorcích postupu.

Poslední záložkou je záložka „Porovnání“, která obsahuje kopii tabulky „Parametry úseku“ a tabulku „Další parametry“ s vybranými veličinami, které jsou důležité pro porovnání metod. Vedle tabulek jsou vytvořena číselná dosazení do rovnic (2.1) až (2.9).

Při používání pouze záložky „Rozhraní“ v případě nehod nehrozí nebezpečí poškození hodnot výpočtu nebo správnosti výpočtů. V případě zásahu do zbylých třech tabulek tomu tak není a zásahem dojde k poškození správné funkce výpočtů.

3.3 Teoretický postup řešení návrhu napájení a způsob provedení v programu

1. Určení délky úseku

Při stanovení délky musíme zohledňovat různé faktory.

Pokud známe délku napájeného úseku a víme, že na úseku nedochází ke křížení, provozu s různou intenzitou provozu a různou délkou v každém směru, pak zadáváme jednoduše danou délku.

Pokud ale musíme zohledňovat křížení, různou délku v každém směru, apod., musíme zjistit tzv. redukovanou délku úseku.

Redukovanou délku úseku vypočteme jako:

$$L = \frac{n_1' \cdot l_1 + n_2' \cdot l_2 + \dots + n_n' \cdot l_n}{n_1' + n_2' + \dots + n_n'} \quad (\text{km}) \quad (3.1)$$

kde: n' ... je počet vlaků v daném úseku za 1 hodinu oběma směry

l_x ... je délka určitého úseku

2. Počet vlaků současně v úseku

Počet vlaků udává množství vozů, které se nachází v daný okamžik v daném napájecím úseku a lze ho vypočítat jako:

$$n = \frac{120 \cdot l}{v_c \cdot \text{int}} \quad (-) \quad (3.2)$$

kde: int ... je interval jednotného vozu [min]

v_c ... je cestovní rychlost [km/hod]

3. Počet vlaků v daném úseku za 1 hodinu oběma směry

Počet vlaků v požadovaném úseku získáme vyřešením následující rovnice:

$$n' = \frac{60 \cdot 2}{\text{int}} \quad (-) \quad (3.3)$$

kde: int ... je interval jednotného vozu [min], hodnoty jsou v bodě 1. teoretického postupu.

4. Součet všech odporů napájecí části

Odpor napájecí části je dán součtem jednotlivých podčástí napájecí části, tedy součtem odporu kabelu, který přivádí energiemi a trolejového vedení, tedy touto rovnicí:

$$R_N = \sum_{j=1}^x R_{n(j)} = \rho_{Cu-1km} \cdot L + n_k^{-1} \cdot \rho_{Al} \cdot l_k \quad (\Omega) \quad (3.4)$$

kde: ρ_{Cu-1km} ... je odpor trolejového vedení o délce 1km

ρ_{Al-1km} ... je odpor hliníkového kabelu o délce 1km

n_k^{-1} ... je převrácená hodnota počtu Al kabelů použitých pro připojení troleje (nahrazuje výpočet odporu paralelně řazených kabelů, protože se používá jen jeden typ vodiče)

5. Součet všech odporů zpětné části

Stejně tak jako u odporů napájecí části, je odpor zpětné části dán součtem všech podčástí zpětné části:

$$R_Z = \sum_{j=1}^x R_{Z(j)} = \rho_{Kolej/Cu-1km} \cdot L + n_k^{-1} \cdot \rho_{Al} \cdot l_k \quad (\Omega) \quad (3.5)$$

kde: $\rho_{Kolej/Cu-1km}$... je odpor kolejnice nebo trolejového vedení o délce 1km (záleží na typu provozované trati Tramvaj/Trolejbus)

6. Náhradní odpor měřírny

Pro výpočet celkového odporu v bodě 8 potřebujeme zjistit náhradní odpor měřírny, který vypočteme pomocí této rovnice:

$$R_M = \frac{U_0 - U_n}{I_n} \quad (\Omega) \quad (3.6)$$

kde U_0 ... napětí naprázdno (720V) [V]

U_n ... napětí jmenovité (660V) [V]

I_n ... jmenovitý proud nejmenší usměrňovací jednotky měřírny [A]

7. Celkový odpor

V tomto kroku, jak již říká název, si určíme celkový odpor daného úseku. Celkový odpor je dán touto rovnicí:

$$R_C = R_M + R_N + R_Z \quad (\Omega) \quad (3.7)$$

kde: R_M ... náhradní odpor měřírny [Ω]

R_N ... odpor napájecí části [Ω]

R_Z ... odpor zpětné části [Ω]

8. Měrná spotřeba w

Abychom mohli pokračovat v návrhu a kontrole napájení daného úseku, musíme spočítat měrnou spotřebu w.

$$w = \left[2,72 \cdot (p_0 \pm p_s) + \frac{z}{l} \right] \cdot \frac{1}{\eta_c} \quad (\text{Wh/t}) \quad (3.8)$$

kde	p_0	...měrný jízdní odpor	[Wh/t]
	p_s	... odpor stoupání	[‰]
	z	...Rozjezdové a brzdné ztráty	[Wh/t]
	η_c	...celková účinnost vozidla (0,69)	[-]

Výpočet poměrného jízdního odporu

Než vyřešíme samotnou měrnou spotřebu, musíme vypočítat první ze tří neznámých v rovnici pro měrnou spotřebu, poměrný jízdní odpor.

$$p_0 = 3,65 + \frac{14,5}{m/P_n} + 0,045 \cdot v_c + \frac{44 \cdot S \cdot v_c^2}{m} 10^{-4} \quad (\text{Wh/t}) \quad (3.9)$$

kde	m	...hmotnost vozidla [t]
	P_n	... počet náprav
	S	... čelní plocha vozidla
	v_c	... cestovní rychlost [km/hod]

Výpočet odporu stoupání

U řešení druhé neznámé, odporu stoupání, máme dvě možnosti, zadat přímo výslednou hodnotu průměrného stoupání, pokud ji známe nebo ji musíme vypočítat dle vztahu:

$$p_s = \frac{p_{s1} \cdot l_1 + p_{s2} \cdot l_2 + \dots + p_{sn} l_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n} \quad (\text{‰}) \quad (3.10)$$

Výpočet rozjezdových a brzdných ztrát

Níže uvedenou rovnicí vyřešíme třetí neznámou v rovnici pro měrnou spotřebu, rozjezdové a brzdné ztráty.

$$Z = 1,072 \cdot 10^{-2} \cdot \xi \cdot v_r^2 \cdot \varepsilon \cdot N \quad (\text{Wh/t}) \quad (3.11)$$

	kde	ξ	... součinitel rotačních hmot (1,25)
		ε	... koeficient respektující účinnost tramvaje při rozjezdové
a brzdné rychlosti		v_r	... rozjezdová (zábrzdná) rychlost (25km/hod)
		Z	... počet zastavení v úseku

9. Efektivní proud I_{ef}

Hledanou hodnotu efektivního proudu získáme výpočtem této rovnice:

$$I_{ef} = l \cdot n' \cdot \left(c_e \cdot \frac{m}{600} \cdot w + \frac{I_p}{v_c} \right) \quad (\text{A}) \quad (3.12)$$

	kde	n'	... počet vlaků v daném úseku za 1 hodinu oběma směry [-]
		c_e	... koeficient efektivního proudu [-]
		m	... hmotnost vozidla [t]
		w	... měrná spotřeba [Wh/tkm]
		I_p	... proud pomocných proudů vozidla (dosazujeme přímo hodnotu z tabulky „Technické údaje vozidel používaných DPMB“)

10. Střední proud I_a

Poté, co jsme vyřešili efektivní proud I_{ef} můžeme výpočtem zjistit střední proud I_a .

$$I_a = \frac{I_{ef}}{c_e} \quad (\text{A}) \quad (3.13)$$

	kde	I_{ef}	... efektivní proud [A]
		c_e	... koeficient efektivního proudu [-]

11. Maximální proud I_{\max}

Maximální proud I_{\max} udává maximální proud, který protéká vedením daného a závisí na počtu vlaků současně v daném úseku. Pokud tedy je počet vlaků v daném úseku roven $n \leq 2,5$, pak dosazujeme přímo hodnotu v [A], tzv. "Rozbor dopravní situace v úseku".

Ovšem pokud nastane opačný stav proti předchozímu, tedy, že počet vlaků v daném úseku je roven $n > 2,5$, poté se výpočet provádí podle vztahu:

$$I_{\max} = \left[I_{\text{ef1vozu}} + (I_r - I_{\text{ef1vozu}}) \cdot 0,82^{\frac{n-1}{N}} \right] \cdot n \quad (\text{A}) \quad (3.14)$$

kde	I_{ef1vozu}	... efektivní proud odebíraný 1 vozem v daném úseku [A]	
	I_r	... rozjezdový proud jednotného typu	[-]
	n	... počet vlaků současně v daném úseku	[-]
	z	... počet zastavení v úseku	[-]

12. Nastavení nadproudové ochrany

Aby při provozu nedocházelo k přetěžování vedení a tím snižování životnosti jednotlivých částí napájení, musíme správně nastavit nadproudové ochrany. Správné nastavení zjistíme výpočtem této rovnice:

$$I_{\max, no} = I_{\max} \cdot \text{koef}(a) \quad (\text{A}) \quad (3.15)$$

kde	I_{\max}	... Maximální proud	[A]
	$\text{koef}(a)$... nadproudový koeficient, volíme 1,1 nebo 1,25	[-]

13. Minimální zkratový proud $I_{k\min}$

Minimální zkratový $I_{k\min}$ je nejmenší zkratový proud, který bude protékat při poruchovém stavu. Zjistíme ho výpočtem rovnice:

$$I_{k\min} = \frac{\text{koef}(c) \cdot U_0}{R_c} \quad (\text{A}) \quad (3.16)$$

kde	U_0	... napětí naprázdno (720V)	[V]
	$\text{koef}(c)$... koeficient zkratového proudu, volíme 0,8 nebo 0,95	

14. Nastavení zkratové ochrany

Abychom zabránili škodám způsobených zkratovým proudem, musíme správně nastavit zkratovou ochranu. Hodnotu, při které bude ochrana reagovat, vypočteme:

$$I_{k \min, zo} = \frac{I_{k \min}}{\text{koef}(b)} \quad (\text{A}) \quad (3.17)$$

kde $I_{k \min}$... minimální zkratový proud [A]
 $\text{koef}(b)$... volíme 1,15 nebo 1,25

Nastavení zkratové ochrany volíme: $I_{k \min, zo, nast} = \dots \text{A}$

15. 1. podmínka nerovnosti

Po spočtení všech potřebných hodnot musí být splněna podmínka pro nadproudy:

$$I_{\max, no} \leq I_{\max, no, nast} \leq I_{k \min, zo} \quad (\text{A}) \quad (3.18)$$

kde $I_{\max, no}$... maximální proud, který může protékat obvodem
 $I_{\max, no, nast}$... maximální proud nastavený na nadproudové ochraně
 $I_{k \min, zo}$... nejmenší proud, na kterou reaguje zkratová ochrana

16. 2. podmínka nerovnosti

Kromě 1. podmínky nerovnosti musí být splněna též tato druhá podmínka, která je dána jako:

$$I_{\max, no} \leq I_{k \min, zo, nast} \leq I_{k \min, zo} \quad (\text{A}) \quad (3.19)$$

kde $I_{\max, no}$... maximální proud, který může protékat obvodem
 $I_{k \min, zo, nast}$... nejmenší zkratový proud nastavený na zkratové ochraně
 $I_{k \min, zo}$... nejmenší zkratový proud, na kterou reaguje zkratová
ochrana

17. Úbytek napětí ΔU

Úbytek napětí v celém obvodu napájení trakce MHD vypočítáme jako:

$$\Delta U = (R_c - R_m) \cdot I_{\max} \quad (\text{V}) \quad (3.20)$$

Výsledný úbytek napětí musí splňovat podmínku:

$$\Delta U \leq 260\text{V} \quad (3.21)$$

Pokud není podmínka splněna, potom je nutné počítat úbytek napětí po jednotlivých zadaných částech obvodu, tzn. pro každý dílčí odpor počítat proud dle skladby vozů v úseku (proudy se zadávají ručně).

18. Příkon dodávaný do úseku P:

Posledním výpočtem návrhu napájení, který nutno provést, je výpočet příkonu P.

$$P = I_a \cdot U \cdot 10^{-6} \quad (\text{MW}) \quad (3.22)$$

3.4 Porovnání metod

Porovnání se provede pomocí výpočtů v Excelu, přičemž se vychází ze vztahů (2.1) až (2.8), které jsou uvedené v literaturách [1.1], [1.2] a [1.3]. Samotné porovnání s naměřenými hodnotami se provede pomocí vztahu (2.9).

Měrný jízdní odpor

$$p_0 = 3,65 + \frac{14,5}{m/P_n} + 0,045 \cdot v + \frac{44 \cdot S \cdot v^2}{m} \cdot 10^{-4} \quad (\text{N/kN}) \quad (2.7)$$

Literatura [1.1]**Měrná spotřeba na konání trakční práce**

$$w_0 = 2,72 \cdot \frac{P_0 \pm P_s}{\eta_v} \text{ (Wh/tkm)} \quad (2.1)$$

Měrná spotřeba pro rozjezd a brzdění

$$w_r = 1,072 \cdot 10^{-2} \cdot \xi \cdot v_z^2 \cdot \frac{N}{L} \cdot \frac{1}{\eta_T} \text{ (Wh/tkm)} \quad (2.2)$$

Celková spotřeba energie

$$w = w_0 + w_r \text{ (Wh/tkm)} \quad (2.2)$$

Literatura [1.2]**Rozjezdové a brzděné ztráty**

$$z = 1,072 \cdot 10^{-2} \cdot \xi \cdot v_r^2 \cdot \varepsilon \text{ (Wh/t)} \quad (2.4)$$

Měrná spotřeba na konání trakční práce

$$w_0 = \left[2,72 \cdot (p_0 \pm p_s) + \frac{z}{s} \right] \cdot \frac{1}{\eta_c} \text{ (Wh/tkm)} \quad (2.3)$$

Literatura [1.3]**Rozjezdové a brzděné ztráty**

$$z = 1,072 \cdot 10^{-2} \cdot \xi \cdot v_r^2 \cdot \varepsilon \cdot N \text{ (Wh/t)} \quad (2.6)$$

Měrná spotřeba na konání trakční práce

$$w_0 = \left[2,72 \cdot (p_0 \pm p_s) + \frac{z}{l} \right] \cdot \frac{1}{\eta_c} \text{ (Wh/tkm)} \quad (2.5)$$

Další použité výpočtové vztahy:

Měrná spotřeba energie

$$A = w \cdot m \cdot L \text{ (W.h)} \quad (2.8)$$

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot

$$\delta = \frac{A - A_s}{A_s} \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (3.23)$$

4 ČÍSELNÉ DOSAZENÍ A POPIS NASTAVENÍ PROGRAMU

4.1 Zadání výpočtu

Vypočtete spotřebu energie v úseku o zadaných parametrech. Dále určete nastavení ochran úseku a zda jsou splněny všechny požadované podmínky.

Porovnejte vypočtené hodnoty s naměřenými.

Parametry úseku:

Celková délka úseku	0,560km
Počet zastavení v úseku	2
Průměrná vzdálenost zastávek	0,280km
Sklon trati	0

Další parametry:

Délka kabelu	0,1km
Nejmenší usměrňovací jednotka	2000A
Uloženo	na vlastním tělese
Použité vozy	T3
Zatížení vozidel	Normální
Lokalita trati	Okraj města
Naměřená spotřeba	1598,56Wh

4.2 Kontrolní výpočet

Při výpočtech se neobejdeme bez určitých konstant či koeficientů, které jsou uvedeny v přílohách

1. Určení délky úseku

Délku je možné určit přímo, nebo pomocí redukované délky. V tomto případě, kdy známe celkovou délku, není třeba řešit redukovanou délku podle vztahu (4.1).

$$l = 0,560km$$

2. Počet vlaků současně v úseku

„Počet vlaků současně v úseku“ je řešen podle rovnice (4.2).

$$n = \frac{120 \cdot 0,560}{24 \cdot 0,5} = 5,6$$

Pro správný výpočet musíme zvolit „Rychlost“ a „Interval jednotného typu“.

V položce „Rychlost“ musíme zvolit městskou lokalitu, ve které se trať nachází, zvolením lokality použijeme předem stanovenou průměrnou rychlost dané lokality. Jelikož vypočtený úsek je uložen na vlastním tělese, zvolíme položky v zelených políčkách rovny „nula“, čímž se přepne hodnota v poli pro vlastní těleso na hodnotu „jedna“, která umožní pracovat s rychlostí 24km/h.

V položce „Interval jednotného typu“ volíme častot vozidel provozovaných na úseku. V úseku se provozují sprážené tramvajové vozy T3, tedy „Interval jednotného typu“ bude roven 0,5.

2. Počet vlaků současně v úseku					
n=	120	x	0,56	=	5,6
	24	x	0,5		
					[-]

Obr. 4-1 Zobrazení výpočtu položky „Počet vlaků současně v úseku“ v Excelu

3. Počet vlaků v daném úseku za 1 hodinu oběma směry

Řešení položky „Počet vlaků v daném úseku za 1 hodinu oběma směry“ je dán vztahem (4.3).

$$n' = \frac{60 \cdot 2}{0,5} = 240$$

Do rovnice dosazujeme pouze Interval jednotného typu, který byl zvolen již pro výpočet předchozí položky.

3. Počet vlaků v úseku za hodinu oběma směry					
n'=	60	x	2	=	240
			0,5		
					[-]

Obr. 4-2 Zobrazení výpočtu položky „Počet vlaků v úseku za 1 hodinu oběma směry“ v Excelu

4. Součet všech odporů napájecí části

Výpočet odporů napájecí části vychází z rovnice (4.4).

$$R_N = 0,0179\Omega \cdot km^{-1} \cdot 0,560km + 1^{-1} \cdot 0,0588\Omega \cdot km^{-1} \cdot 0,1km = 0,0159\Omega$$

U položky „Počet kabelů a délka kabelu mezi napájecí stanicí a tratí“, jak již říká název, zadáváme délku a počet kabelů použitý pro napájecí a zpětné části napájecího okruhu, s rostoucím počtem se současně snižuje odpor kabelových částí, protože se používá jednotný hliníkový vodič.

4. Celkový odpor napájecí části				
R_N=	0,0100	+	0,0059	= 0,0159 Ω

Obr. 4-3 Zobrazení výpočtu položky „Celkový odpor napájecí části“ v Excelu

5. Součet všech odporů zpětné části

Při výpočtu celkového odporu zpětné části použijeme rovnici (4.5).

$$R_Z = \sum_{j=1}^x R_{Z(j)} = 0,0117\Omega \cdot km^{-1} \cdot 0,560km + 1^{-1} \cdot 0,0588\Omega \cdot km^{-1} \cdot 0,1km = 0,0124\Omega$$

U výpočtu odporů zpětné části je položka „Počet kabelů a délka kabelu mezi napájecí stanicí a tratí“ stejná jako u výpočtu odporů napájecí části.

V položce „Uložení kolejnice/Měrný odpor“ volíme typ uložení kolejnice, zda je uložena v zádlažbě, či je uložena na vlastním tělese. Tomuto uložení odpovídá použití určitého typu kolejnice, která má svůj specifický měrný odpor. Platí pouze v případě, že použijeme kolejová vozidla, v případě použití trolejbusů je tento odpor nahrazen odporem troleje.

5. Celkový odpor zpětné části				
R_Z=	0,0066	+	0,0059	= 0,0124 Ω

Obr. 4-4 Zobrazení výpočtu položky „Celkový odpor zpětné části“ v Excelu

6. Náhradní odpor měřírny

Při výpočtu náhradního odporu měřírny vycházíme z rovnice (4.6).

$$R_m = \frac{720 - 660}{2000} = 0,03\Omega$$

Hodnoty napětí jsou uloženy mezi tabulkovými hodnotami a jsou neměnné. Jejich hodnoty jsou: $U_0=720V$ a $U=660V$.

U veličiny „Jmenovitý proud nejmenší usměrňovací jednotky“ zadáváme číslo, nevyžaduje žádné úpravy ve formě voleb, její hodnota je 2000A.

6.	Odpor měřírny							
R_m=	720	-	660	=	0,030	Ω		
	2000							

Obr. 4-5 Zobrazení výpočtu položky „Odpor měřírny“ v Excelu

7. Celkový odpor

Celkový odpor spočteme pomocí rovnice (4.7).

$$R_C = 0,0159\Omega + 0,0124\Omega + 0,0300\Omega = 0,0583\Omega$$

7.	Celkový odpor							
R_C=	0,0159	+	0,0124	+	0,0300	=	0,0583	Ω

Obr. 4-6 Zobrazení výpočtu položky „Celkový odpor“ v Excelu

8. Měrná spotřeba w

Výpočet měrné spotřeby je definován vztahem (4.8). Pro jeho výpočet ale potřebujeme nejdřív znát Poměrný jízdní odpor, Odpor stoupání a Rozjezdové a brzdné ztráty.

Výpočet poměrného jízdního odporu

Výpočet poměrného jízdního odporu je definován rovnicí (4.9).

$$p_0 = 3,65 + \frac{14,5}{24,2t/4} + 0,045 \cdot 24km \cdot h^{-1} + \frac{44 \cdot 9m^2 \cdot (24kmh^{-1})^2}{24,2t} 10^{-4} = 8,069Wh/t$$

Volbou typu vozu v položce „Interval jednotného typu“ volíme současně položku „Hmotnost vozidla, počet náprav daného typu vozidla“. Volbou určíme použití hodnoty hmotnosti vozidla, která pro tramvajovou soupravu T3 je 24,2t při normálním zatížení, souprava má 8 náprav.

Rychlost v_c byla zvolena v bodě 2 „Počet vlaků současně v úseku“.

Čelní plocha vozidla S je konstantní hodnota $S=9\text{m}^2$.

$p_0=$	3,7	+	$\frac{14,5}{24,2}$	/	4	+	0,045	x	24	+	$\frac{44 \times 9 \times 576}{24,2}$	x	1,E-04	=	8,069	Wh/tkm
--------	-----	---	---------------------	---	---	---	-------	---	----	---	---------------------------------------	---	--------	---	-------	--------

Obr. 4-7 Zobrazení výpočtu položky „Výpočet poměrného jízdního odporu“ v Excelu

Výpočet odporu stoupání

Celkový odpor stoupání je dán vztahem (4.10).

$$p_s = 0\text{‰}$$

Vzhledem k tomu, že známe celkové stoupání není ho potřeba rozepisovat do vzorce.

Výpočet rozjezdových a brzdných ztrát

Rozjezdové a brzdné ztráty vypočteme dosazením do rovnice (4.11).

$$Z = 1,072 \cdot 10^{-2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 \cdot 1,7 \cdot 2 = 28,475\text{Wh/t}$$

Do rovnice (4.11) dosazujeme součinitel ztrát, který má hodnotu 1,25 a je zapsán přímo do vzorce. Rozjezdová (brzdná) rychlost má hodnotu 25km/h.

Koeficient respektující účinnost tramvaje při rozjezdové a brzdné rychlosti je volen dle umístění trati v městské oblasti. Trať je umístěna na okraji města, proto její hodnota je 1,7.

Výpočet rozjezdových a brzdných ztrát												
$Z=$	1,07E-02	x	1,25	x	625	x	1,7	x	2	=	28,475	Wh/t

Obr. 4-8 Zobrazení výpočtu položky „Výpočet rozjezdových a brzdných ztrát“ v Excelu

Nyní můžeme vypočítat měrnou spotřebu.

$$w = \left[2,72 \cdot (8,069 \text{Wh} / \text{tkm} \pm 0) + \frac{28,475 \text{Wh} / \text{t}}{0,560 \text{km}} \right] \cdot \frac{1}{0,69} = 105,502 \text{Wh} / \text{tkm}$$

Měrná spotřeba												
W=	$\frac{1}{0,69}$	x	2,72	x	8,069	±	0	+	$\frac{28,475}{0,56}$	=	$\frac{105,502}{105,502}$	Wh/tkm

Obr. 4-9 Zobrazení výpočtu položky „Výpočet rozjezdových a brzdných ztrát“ v Excelu

9. Efektivní proud I_{ef}

Hodnotu efektivního proudu zjistíme dosazením do rovnice (4.12).

$$I_{ef} = 0,560 \text{km} \cdot 240 \cdot \left(1,33 \cdot \frac{24,2}{600} \cdot 105,502 \text{Wh}(\text{tkm})^{-1} + \frac{60 \text{A}}{24 \text{km} \cdot \text{h}^{-1}} \right) = 929 \text{A}$$

Délku úseku známe ze zadání, Počet vlaků v daném úseku za 1 hodinu oběma směry bylo určeno v bodě 3. Hmotnost vozidla byla určena při výpočtu měrné spotřeby. Rychlost byla zvolena v bodě 2.

Stejně tak, jak tomu bylo při volbě hmotnosti, platí tomu u volby proudů pomocných pohonů vozidel, tedy zvolením typu vozidla u volby „Interval jednotného typu“. Její hodnota je 60A.

Volba položky „Koeficient respektující účinnost“ se provádí automaticky podle celkového sklonu úseku. Hodnoty, podle kterých dochází k určení koeficientu jsou uvedeny v Příloze B.

Výslednou hodnotu zaokrouhlujeme na jednotky.

9. Efektivní proud I_{ef}														
I_{ef}=	240	x	0,560	x	1,33	x	$\frac{24,2}{600}$	x	105,502	+	$\frac{30}{24}$	=	929	A

Obr. 4-10 Zobrazení výpočtu položky „Výpočet rozjezdových a brzdných ztrát“ v Excelu

10. Střední proud I_a

Střední proud I_a vypočteme pomocí rovnice (4.13).

$$I_a = \frac{929 \text{A}}{1,33} = 698 \text{A}$$

Efektivní proud I_{ef} je vypočten v předchozím bodě. Koeficient c_e byl definován též v předchozím bodě.

Výslednou hodnotu zaokrouhlíme na jednotky.

10. Střední proud I_a			
$I_a =$	929	=	698 A
	1,33		

Obr. 4-11 Zobrazení výpočtu položky „Střední proud I_a “ v Excelu

11. Maximální proud I_{max}

Celkový maximální prou I_{max} je dán rovnicí (4.14).

$$I_{max} = \left[929A + (450 - 929) \cdot 0,82^{\frac{5,6-1}{2}} \right] \cdot 5,6 = 3503A$$

Proud $I_{ef1vozu}$ je proud I_{ef} , který je vypočten v bodě 9.

Rozjezdový proud jednotného typu určíme z tabulkových hodnot pomocí volby vozidla, který byl proveden u volby veličiny „Interval jednotného typu“.

Počet vlaků současně v daném úseku je určen v bodě 2. Počet zastavení v úseku je zadán v Zadání.

Zaokrouhlujeme na jednotky.

11. Maximální proud I_{max}											
$I_{max} =$	929	+	450	-	929	x	0,634	x	5,6	=	3503 A

Obr. 4-12 Zobrazení výpočtu položky „Maximální proud I_{max} “ v Excelu

12. Nastavení nadproudové ochrany

Výpočet pro nastavení ochran se provede podle rovnice (4.15).

$$I_{max,no} = 3503A \cdot 1,25 = 4379A$$

Koef(a) je tabulkovou hodnotou, byla použita hodnota 1,25.

Zaokrouhlujeme na jednotky.

Hodnotu pro nastavení ochrany volíme nejbližší vyšší hodnotu na ochraně, tedy 4400A, po zaokrouhlení na nejbližší vyšší hodnotu.

12. Nastavení nadproudové ochrany				
$I_{\max, \text{no}} =$	3503	x	1,25	= 4379 A
$I_{\max, \text{no}, \text{nast}} =$	4400			A

Obr. 4-13 Zobrazení výpočtu položky „Nastavení nadproudové ochrany“ v Excelu

13. Minimální zkratový proud $I_{k\min}$

Minimální zkratový proud $I_{k\min}$ vypočteme podle vztahu (4.16).

$$I_{k\min} = \frac{0,8 \cdot 720V}{0,0583\Omega} = 9874A$$

Hodnota U_0 je tabulkovou hodnotou o hodnotě $U_0=720V$. Celkový odpor byl spočten v bodě 9.

Koef(c) je tabulkovou hodnotou, byla použita hodnota 0,8.

13. Minimální zkratový proud $I_{k\min}$				
$I_{k\min} =$	0,8	x	720	= 9874 A
	0,0583			

Obr. 4-14 Zobrazení výpočtu položky „Minimální zkratová proud $I_{k\min}$ “ v Excelu

14. Nastavení zkratové ochrany

Hodnotu pro nastavení zkratových ochran získáme dosazením do vztahu (4.17).

$$I_{k\min, \text{zo}} = \frac{9874}{1,25} = 7899A$$

Při výpočtu použijeme hodnotu koef(b)=1,25.

Pro nastavení zkratové ochrany volíme hodnotu 7850A.

14. Nastavení zkratové ochrany			
$I_{kmin,zo}$	$\frac{9874}{1,25}$	=	7899 A
$I_{max,zo,nast}$	7850		A

Obr. 4-15 Zobrazení výpočtu položky „Nastavení zkratové ochrany“ v Excelu

15. 1. podmínka nerovnosti

Tato podmínka je dána vztahem (4.18).

$$2780A \leq 2800 \leq 7899$$

15. 1. podmínka				
$I_{max,no}$	\leq	$I_{max,no,nast}$	\leq	$I_{kmin,zo}$
4379	\leq	4400	\leq	7899
SPLNĚNO				

Obr. 4-16 Zobrazení výpočtu položky „1. podmínka nerovnosti“ v Excelu

16. 2. podmínka nerovnosti

Současně s 1. podmínkou musí být splněna i 2. podmínka, kterou definuje vztah (4.19).

$$2780A \leq 7850A \leq 7899A$$

16. 2. podmínka				
$I_{max,no}$	\leq	$I_{kmin,zo,nast}$	\leq	$I_{kmin,zo}$
4379	\leq	7850	\leq	7899
SPLNĚNO				

Obr. 4-17 Zobrazení výpočtu položky „2. podmínka“ v Excelu

17. Úbytek napětí ΔU

Úbytek napětí je poslední podmínkou, která musí být splněna.

Výpočet úbytku napětí je dán vztahem (4.20).

$$\Delta U = (0,0583\Omega - 0,0300\Omega) \cdot 3503A = 99,26V$$

17. Úbytek napětí									
$\Delta U =$	0,0583	-	0,0300	x	3503	=	99,26	V	

Obr. 4-18 Zobrazení výpočtu položky „Úbytek napětí“ v Excelu

Výsledný úbytek napětí musí splňovat podmínku podle vztahu (4.21).:

$$71,60V \leq 260V$$

99,26	V	≤	260	V
VYHOVUJE				

Obr. 4-19 Zobrazení výpočtu položky „Povolený úbytek napětí“ v Excelu

18. Příkon dodávaný do úseku P:

$$P = 698A \cdot 660V \cdot 10^{-6} = 0,46MW \text{ (MW)}$$

18. Příkon dodávaný do úseku									
P=	698	x	660	x	1,0E-06	=	0,46	MW	

Obr. 4-20 Zobrazení výpočtu položky „Povolený úbytek napětí“ v Excelu

4.3 Porovnání metod

Měrný jízdní odpor

$$p_0 = 3,65 + \frac{14,5}{24,2t/4} + 0,045 \cdot 24km \cdot h^{-1} + \frac{44 \cdot 9m^2 \cdot (24km \cdot h^{-1})^2}{24,2} \cdot 10^{-4} = 8,069Wh / tkm$$

Výpočet poměrného jízdního odporu														
$p_0 =$	3,65	+	$\frac{14,5}{24,2 / 4}$	+	0,045	x	24	+	$\frac{44 \times 9 \times 576}{24,2}$	x	1,E-04	=	8,069	Wh/tkm

Obr. 4-21 Zobrazení výpočtu „Výpočet poměrného jízdního odporu“ v Excelu pro porovnání

Literatura [1.1]

Měrná spotřeba na konání trakční práce

$$w_0 = 2,72 \cdot \frac{8,069Wh / tkm \pm 0}{0,8} = 27,435Wh / tkm$$

Měrná spotřeba pro rozjezd a brzdění

$$w_r = 1,072 \cdot 10^{-2} \cdot 1,25 \cdot (25kmh^{-1})^2 \cdot \frac{2}{0,560km} \cdot \frac{1}{0,45} = 66,4683Wh / tkm$$

Celková spotřeba energie

$$w = 27,435 + 66,468 = 93,904Wh / tkm$$

1. Jansa												
$w_0 =$	2,72	x	$\frac{8,069 \pm 0}{0,8}$	=	$\frac{27,435}{27,435}$	Wh/tkm						
$w_r =$	1,07E-02	x	1,25	x	625	x	$\frac{2}{0,56}$	x	$\frac{1}{0,45}$	=	66,4683	Wh/tkm
$w =$	27,435	+	66,468	=	93,904	Wh/tkm						

Obr. 4-22 Zobrazení výpočet „Výpočet spotřeby energie podle [1.1]“ v Excelu pro porovnání

Literatura [1.2]

Rozjezdové a brzděné ztráty

$$z = 1,072 \cdot 10^{-2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 \cdot 1,7 = 14,2375 \text{ Wh/t}$$

Z=	1,07E-02	x	1,25	x	625	x	1,7	=	14,2375	Wh/t
----	----------	---	------	---	-----	---	-----	---	---------	------

Obr. 4-23 Zobrazení výpočtu „Výpočet Rozjezdových a brzděných ztrát podle [1.2]“ v Excelu pro porovnání

Měrná spotřeba na konání trakční práce

$$w = \left[2,72 \cdot (8,069 \text{ Wh/tkm} \pm 0) + \frac{14,2375 \text{ Wh/t}}{0,280 \text{ km}} \right] \cdot \frac{1}{0,69} = 103,644 \text{ Wh/tkm}$$

W=	$\frac{1}{0,69}$	x	2,72	x	8,069	±	0	+	$\frac{14,2375}{0,280}$	=	$\frac{105,502}{105,502}$	Wh/tkm
----	------------------	---	------	---	-------	---	---	---	-------------------------	---	---------------------------	--------

Obr. 4-24 Zobrazení výpočtu „Výpočet spotřeby energie podle [1.2]“ v Excelu pro porovnání

Literatura [1.3]

Měrná spotřeba na konání trakční práce

Rozjezdové a brzděné ztráty

$$z = 1,072 \cdot 10^{-2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 \cdot 1,7 \cdot 2 = 28,475 \text{ Wh/t}$$

$$w = \left[2,72 \cdot (8,069 \text{ Wh/tkm} \pm 0) + \frac{28,48 \text{ Wh/t}}{0,560 \text{ km}} \right] \cdot \frac{1}{0,69} = 105,502 \text{ Wh/tkm}$$

Z=	1,07E-02	x	1,25	x	625	x	1,7	x	2	=	28,475	Wh/t
----	----------	---	------	---	-----	---	-----	---	---	---	--------	------

Obr. 4-25 Zobrazení výpočtu „Výpočet Rozjezdových a brzděných ztrát podle [1.3]“ v Excelu pro porovnání

Měrná spotřeba												
W=	1	x	28,48	+	8,069	±	0	x	2,72	=	105,502	Wh/tkm
	0,69		0,56								105,502	

Obr. 4-26 Zobrazení výpočtu „Výpočet spotřeby energie podle [1.3]“ v Excelu pro porovnání

Další použité výpočtové vztahy:**Spotřeba energie**

Spotřeba energie se vypočte podle rovnice (4.21).

$$A = 93,904 \text{Wh} / \text{tkm} \cdot 24,2 \text{t} \cdot 0,560 \text{km} = 1272,583 \text{Wh}$$

$$A = 105,502 \text{Wh} / \text{tkm} \cdot 24,2 \text{t} \cdot 0,560 \text{km} = 1429,766 \text{Wh}$$

$$A = 105,502 \text{Wh} / \text{tkm} \cdot 24,2 \cdot 0,560 \text{km} = 1429,766 \text{Wh}$$

A=	93,904	x	24,2	x	0,56	=	1272,583	Wh
	105,502						1429,766	
	105,502						1429,766	

Obr. 4-27 Zobrazení výpočtu „Výpočet Rozjezdových spotřeby energie“ v Excelu pro porovnání

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot

$$\delta = \frac{1429,766 \text{Wh} - 1598,56 \text{Wh}}{1598,56 \text{Wh}} \cdot 100 = -20,392\%$$

$$\delta = \frac{1429,766 \text{Wh} - 1598,56 \text{Wh}}{1598,56 \text{Wh}} \cdot 100 = 10,559\%$$

$$\delta = \frac{1429,766 \text{Wh} - 1598,56 \text{Wh}}{1598,56 \text{Wh}} \cdot 100 = -10,559\%$$

δ=	1272,583	-	1598,56	x	100	=	-20,392	%
	1598,56							
	1429,766	-	1598,56	x	100	=	-10,559	%
	1598,56							
	1429,766	-	1598,56	x	100	=	-10,559	%
	1598,56							

Obr. 4-28 Zobrazení výpočtu „Výpočet chyby výpočtu“ v Excelu pro porovnání

4.4 Tabulky vypočtených hodnot

2.	Počet vlaků současně v úseku	5,6	-
3.	Počet vlaků v úseku za hodinu oběma směry	240	-
4.	Celkový odpor napájecí části	0,0159	Ω
5.	Celkový odpor zpětné části	0,0124	Ω
6.	Odpor měnirny	0,0300	Ω
7.	Celkový odpor	0,0583	Ω
8.	Měrná spotřeba	105,502	Wh/tkm
		105,502	Wh/tkm
9.	Efektivní proud I _{ef}	929	A
10.	Střední proud I _a	698	A
11.	Maximální proud I _{max}	3503	A
12.	Nastavení nadproudové ochrany	4400	A
13.	Minimální zkratový proud I _{kmin}	9874	A
14.	Nastavení zkratové ochrany	7850	A
15.	1. podmínka $I_{\max, \text{no}} \leq I_{\max, \text{no, nast}} \leq I_{\text{kmin, zo}}$	SPLNĚNO	
16.	2. podmínka $I_{\max, \text{no}} \leq I_{\text{kmin, zo, nast}} \leq I_{\text{kmin, zo}}$	SPLNĚNO	
17.	Úbytek napětí $U \leq 260\text{V}$	VYHOVUJE	
18.	Příkon dodávaný do úseku	0,46	MW

Naměřeno	1598,56 Wh		
	Literatura 1	Literatura 2	Literatura 3
Vypočtené	1272,583 Wh	1429,766 Wh	1429,766 Wh
Odchylka	-20,392 %	-10,559 %	-10,559 %

5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvořit program v Excelu podle pokynů danými zadavatelem této práce.

Navržený program slouží pro přibližné výpočty spotřeby elektrické energie a nastavení parametrů ochran v napájecích stanicích pro trakční vedení tramvají a trolejbusů. Dále má posloužit jako porovnání existujících metod pro výpočet spotřeby energie při provozu MHD.

Při vytváření programu pro výpočet byl použit, jak již bylo zmíněno, program Excel. Pro program byl vytvořen vývojový diagram podle, kterého může uživatel zjistit, jak nastavit určité parametry, pokud výsledné hodnoty pro podmínky dané normami nevyhovují.

Pro kontrolu správné funkčnosti byl proveden kontrolní výpočet na spotřebu energie, nastavení parametrů a nakonec porovnání výpočtu pomocí zmíněných metod za podmínek používaných při výpočtech Dopravním podnikem města Brna.

Výpočtem bylo zjištěno, že při provozu trati s tramvajovými vozy T3 bude měrná spotřeba $w=105,502\text{Wh/tkm}$, což je přepočteno na skutečnou spotřebu $1429,766\text{Wh}$. Vypočtená hodnota je oproti skutečné hodnotě podhodnocena o $10,559\%$.

Provozování trati s vozy T3 může být napájecí stanice namáhána proudem až $I_{\max}=3503\text{A}$, ale pro ochranu použijeme hodnotu s rezervou 25% pro případné výchyly, čímž nastavená hodnota bude $I_{\max,\text{no,nast}}=4400\text{A}$.

Nastane-li porucha, může dojít k průchodu poruchového proudu, který může dosahovat až hodnoty $I_{\text{min}}=9874\text{A}$, ochrana bude nastavena na hodnotu $I_{\text{min,zo,nast}}=7850\text{A}$.

Úbytek napětí na celém okruhu dosahuje hodnoty $99,26\text{V}$, což splňuje podmínku normovaného úbytku napětí do 260V .

Průměrný výkon dodávaný za provozu je $P=0,46\text{MW}$.

Vypočtené hodnoty slouží jako informativní ukazatel pro možný návrh nových tratí, či modernizaci stávajících.

I když vypočtené hodnoty proti hodnotám naměřeným jsou podhodnoceny oproti hodnotám odebíraným za provozu, lze je stále použít pro přibližnou spotřebu, protože se při návrhu uvažuje s rezervami pro případné rozšíření provozu. Výpočty nezahrnují různé dopravní situace a komplikace.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Elektrotechnický obzor, týdeník elektrotechnického průmyslu. Praha 1991/1, str. 32 – 36.
 - [1.1] JANSA, F. Městské dráhy elektrické - část 1., Bratislava 1966.
 - [1.2] HLAVÁČ, J. Závěrečná zpráva úkolu R-2-M-9 Komplexní výpočet napájení sítě městské hromadné dopravy. ÚSMD Praha 1979
 - [1.3] SÚDOP. Závěrečná zpráva výzkumné úlohy R-2M-9 Alternativní energetické výpočty, Brno 1980.
- [2] JANSA, F. Městské dráhy elektrické - část 1., Bratislava 1966.

Příloha A Parametry vozů u DPMB

Spřažená souprava tramvají 2xT3

- hmotnost prázdného vozu/ při normál. obsazení/ při max. obsazení	32,6t/ 48,4t/ 55,2t
- max. proudový odběr jen pro trakci I_m	960A
- max. proudový odběr pomocných spotřebičů I_p	60A
- počet náprav vozidla	8

Článková tramvaj K2

- hmotnost prázdného vozu/ při normál. obsazení/ při max. obsazení	21,5t/ 33,4t/ 36,5t
- max. proudový odběr jen pro trakci I_m	500A
- max. proudový odběr pomocných spotřebičů I_p	36A
- počet náprav vozidla	6

Tramvaj K8 D5

- hmotnost prázdného vozu/ při normál. obsazení/ při max. obsazení	37,0t/ 53,4t/ 61,2t
- max. proudový odběr jen pro trakci I_m	1250A
- max. proudový odběr pomocných spotřebičů I_p	60A
- počet náprav vozidla	10

Trolejbus 14 Tr

- hmotnost prázdného vozu/ při normál. obsazení/ při max. obsazení	10,4t/ 15,3t/ 17,4t
- max. proudový odběr jen pro trakci I_m	310A
- max. proudový odběr pomocných spotřebičů I_p	40,3A
- počet náprav vozidla	2

Trolejbus 15 Tr

- hmotnost prázdného vozu/ při normál. obsazení/ při max. obsazení	15,8t/ 22,9t/ 26,0t
- max. proudový odběr jen pro trakci I_m	600A
- max. proudový odběr pomocných spotřebičů I_p	38A
- počet náprav vozidla	3

Příloha B Parametry potřebné k výpočtu napájení

Koeficienty měrného odporu na 1km délky:

Kabel: hliník – $S=500\text{mm}^2$, $\rho=0,0588\Omega/\text{km}$

Trolej: Měď – $S=100\text{mm}^2$, $\rho=0,0179\Omega/\text{km}$

Kolej: typ N – $\rho=0,0100\Omega/\text{km}$

typ S – $\rho=0,0117\Omega/\text{km}$

Interval jednotného typu vozu

Přepočten na jednotný typ vozu

2xT3 1 KT8D5 1,39

T3 0,50 K2 0,56

Koeficient přepočtu na jednotný typ vozu

Je přímo úměrný rozjezdovému proudu vozu I_r :

$I_r =$ T3 ...450A $I_r =$ KT8D5 ...1250A

2xT3 ...900A K2 ...500A

Tr 14 ...300A Tr15 ...600A

Cestovní rychlost:

město ...14km/hod

okraj města ...19km/hod

vlastní těleso ...24km/hod

koeficient respektující účinnost tramvaje při rozjezdu a brzdovou rychlost:

v centru ... 1,3

na předměstí ... 1,7

koeficient efektivního proudu

p_s	do 20	do 30	do 40	do 50
c_e	1,33	1,25	1,18	1,13