

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd



**Dimenzování vodičů pro osobní automobily**  
**Wires dimensioning for passenger cars**

Bakalářská práce

Adam Kubín

Bakalářský program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor studia: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.

Praha, květen 2019

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kubin** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **465978**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Dimenzování vodičů pro osobní automobily**

Název bakalářské práce anglicky:

**Wires dimensioning for passenger cars**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše v oblasti materiálů vodičů a používaných izolací pro elektrické instalace u osobních automobilů.
- 2) Testy izolace vodičů pro vybrané typy vodičů s ohledem na vliv okolních podmínek.
- 3) Technický návrh redukce průřezů vodičů pro daný typ izolace v konkrétní oblasti vozu.
- 4) Ekonomické zhodnocení technického návrhu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] B. C. Ltd, Electric Cables Handbook, 3 edition. Oxford ; Malden, Mass: Wiley-Blackwell, 1997.  
[2] R. Linhart, Kabely a vodiče, kabelové soubory, spojovací a izolační materiál, 1988.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **06.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Karel Dušek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Dimenzování vodičů pro osobní automobily vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

Adam Kubín

## **Poděkování**

Děkuji všem, kteří mi s vypracováním bakalářské práce pomáhali. Především svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Karlu Duškovi za jeho rady a pedagogickou a odbornou pomoc. Dále Ing. Miroslavu Vítkovi, CSc. a Ing. Martinu Benešovi za poskytnuté konzultace, cenné rady a připomínky k ekonomické části práce. Na závěr chci poděkovat svému vedoucímu stáže ve ŠKODA AUTO a.s. Ing. Janu Sobotkovi a jeho kolegům Ing. Tomáši Konupkovi a Jaroslavu Marešovi za podnětné rady a náměty.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá dimenzováním vodičů pro osobní automobily. To v sobě zahrnuje kritéria dimenzování vodičů, přehled vlastností používaných materiálů k výrobě vodivých jader a izolací vodičů a způsob značení vodičů používaných v automobilovém průmyslu.

Praktická technická část práce se věnuje měření oteplení vodičů vzhledem k teplotě okolí a použité izolaci v závislosti na procházejícím elektrickému proudu vodičem. Účelem tohoto měření je porovnat naměřené hodnoty s hodnotami udávanými interní normou používanou pro dimenzování vodičů v automobilovém průmyslu. Výsledkem této části práce je návrh technického řešení redukce průřezu vodičů v automobilu.

Ekonomická část práce obsahuje určení a výpočet nákladů a úspor technického návrhu redukce průřezů vodičů a vyhodnocení ekonomické efektivnosti investice do tohoto návrhu.

## **Klíčová slova**

Dimenzování vodičů, automobilový průmysl, osobní automobily, elektrické vodiče, měď, hliník, izolanty, automobilová norma, náklady, ekonomické hodnocení investice

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with wires dimensioning for passenger cars. This includes the criteria of dimensioning for automotive industry, overview of the properties of the materials used for conductive cores and wire insulation and a method of marking the wires used in the automotive industry.

The technical practical part of the thesis is devoted to the measurement of the conductor warming with respect to the ambient temperature, the insulation used and the electrical current passing through the wire. All this in order to compare the measured values with the values given by the internal standard used for sizing the wires in the automotive industry. The result of this part is a proposal of a technical solution for reducing the cross-section of wires in a car.

The economic part of the thesis includes determination and calculation of costs and savings of technical design of conductor cross-section reduction and evaluation of economic efficiency of investment in this proposal.

## **Key words**

Wires dimensioning, automotive industry, passenger cars, electrical conductors, copper, aluminum, insulation, automotive standard, cost, economical evaluation of the investment

## Seznam použitých symbolů

$M$	poměrná hmotnost vodiče [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
$C_p$	měrná tepelná kapacita vodiče [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
$P_j$	Jouleovy ztráty [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
$P_r$	výkon odvedený radiací [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
$P_k$	výkon odvedený konvekcí [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ]
$R$	odpor vodiče při konkrétní teplotě [ $\Omega$ ]
$R_0$	odpor vodiče při počáteční teplotě [ $\Omega$ ]
$\alpha$	teplotní součinitel odporu při 20 °C [ $\text{K}^{-1}$ ]
$I$	elektrický proud [A]
$\Delta\vartheta$	teplotní rozdíl [K]
$\rho$	měrný elektrický odpor (rezistivita) [ $\Omega\cdot\text{m}$ , $\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m}$ ]
$l$	délka vodiče [m]
$S$	průřez vodivého jádra vodiče [ $\text{mm}^2$ ]
$\delta$	součinitel přestupu tepla [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
$T_v$	teplota vodiče [°C]
$T_A$	teplota okolí [°C]
$\varepsilon$	emisivita povrchu vodiče [-]
$\sigma$	Stefan – Boltzmanova konstanta
$I_{z, \text{MAX}}$	maximální dovolený zátěžný proud [A]
$I_z$	zátěžný proud [A]
$I_N$	hodnota maximálního dovoleného zátěžného proudu udávaná normou [A]
$t$	teplota jádra vodiče [°C]
$T$	teplota okolí [°C]
$I_{\text{ef}}$	efektivní hodnota proudu
$T_p$	doba provozu
$P_{\text{stř},z}$	střední hodnota ztrátového výkonu [W]
$\Delta P_{\text{stř},z}$	změna střední hodnoty ztrátového výkonu [W]
$\Delta N_i$	navýšení investičních nákladů
$a(r, T_z)$	anuita za dobu životnosti projektu $T_z$ a při diskontu $r$
$\Delta N_{\text{CO}_2}$	změna emisních nákladů vztažená na náhradu 1 m vodiče
$\Delta N_m$	úspora materiálových nákladů vztažená na náhradu 1 m vodiče
$k$	počet vyrobených vozů, ve kterých můžu nahradit průřezy

## Seznam použitých zkratk

CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý
Cu – ETP	elektrolytická žíhaná houževnatá měď
CuAg	slitina měď – stříbro
CuMg	slitina měď – hořčík
CuSn	slitina měď – cín
FEP	tetrafluoretylen
IACS	International Annealed Copper Standard
NEDC	New European Driving Cycle
PA	polyamid
PE	polyetylen
PP	polypropylen
PVC	polyvinylchlorid
SEI	svazky elektrické instalace
SIR	silikonová pryž
ŠA	ŠKODA AUTO a.s.
TPE – O	polyolefinelastomer
TPE – U	Polyeterpolyuretan
VW	Volkswagen
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test



## Obsah

1. Úvod .....	11
2. Kritéria pro dimenzování vodičů .....	12
2.1. Dovolená provozní teplota (proudová zatížitelnost) .....	12
2.1.1. Jouleovy ztráty .....	13
2.1.2. Výkon odvedený konvekcí .....	14
2.1.3. Výkon odvedený radiací .....	14
2.1.4. Výpočet proudové zatížitelnosti .....	15
3. Vlastnosti elektroinstalace v automobilu .....	16
4. Popisování typů vodičů .....	18
5. Materiály používané k výrobě jader vodičů v osobních automobilech .....	20
5.1. Měď .....	20
5.2. Slitiny mědi .....	22
5.2.1. Měď – stříbro (CuAg) .....	23
5.2.2. Měď – hořčík (CuMg) .....	24
5.2.3. Měď – cín (CuSn) .....	24
5.3. Hliník .....	25
5.4. Porovnání materiálů – charakteristiky .....	26
6. Materiály používané k výrobě izolací vodičů v osobních automobilech .....	27
6.1. Polyvinylchlorid – PVC .....	29
6.2. Polyetylen – PE .....	29
6.3. Polyamid – PA .....	29
6.4. Polyeterpolyuretan TPE-U .....	30
6.5. Silikony SIR .....	30
7. Měření oteplení vodičů v různých teplotách okolí .....	31
7.1. Vybrané vodiče pro měření .....	31
7.2. Popis měření .....	32
7.3. Postup měření a použité přístroje .....	32
7.4. Měřicí pracoviště .....	35
7.5. Grafické znázornění naměřených dat .....	36
7.6. Porovnání naměřených hodnot .....	38
7.6.1. Průřez vodiče 0,35 mm <sup>2</sup> .....	39
7.6.2. Průřez vodiče 0,5 mm <sup>2</sup> .....	40
7.6.3. Průřez vodiče 0,75 mm <sup>2</sup> .....	41
7.6.4. Průřez vodiče 1 mm <sup>2</sup> .....	42
7.6.5. Průřez vodiče 1,5 mm <sup>2</sup> .....	43

7.6.6.	Průřez vodiče 2,5 mm <sup>2</sup> .....	44
8.	Technický návrh redukce průřezů vodičů .....	45
8.1.	Premisy technického návrhu .....	45
8.1.1.	Dovolená proudová zatížitelnost .....	45
8.1.2.	Dovolené úbytky napětí .....	46
8.1.3.	Odolnost vůči zkratům a funkčnost jištění .....	46
8.1.4.	Mechanická pevnost vodiče .....	47
8.1.5.	Přesnost měření a nepřesnosti při výrobě vodičů .....	47
8.1.6.	Uložení vodičů ve svazku .....	47
8.2.	Postup při realizaci technického návrhu .....	47
9.	Ekonomické zhodnocení technického návrhu .....	49
9.1.	Investiční náklady .....	49
9.2.	Cena mědi a vodičů .....	49
9.3.	Emise CO <sub>2</sub> .....	50
9.4.	Diskontní sazba .....	50
9.5.	Výroba elektrické energie v automobilu .....	51
9.5.1.	Vyjádření elektrických ztrát pomocí emisí .....	52
9.6.	Zjednodušující předpoklady .....	54
9.7.	Zhodnocení efektivnosti investice .....	55
9.7.1.	Scénář I. – uvažování emisních poplatků .....	56
9.7.2.	Scénář II. – neuvažování emisních poplatků .....	58
9.8.	Doba návratnosti investice .....	60
10.	Závěr .....	61
	Seznam použité literatury .....	63
	Seznam obrázků .....	65
	Seznam tabulek .....	65
	Seznam grafů .....	66
	Seznam rovnic .....	66
	Příloha A – naměřené a vypočtené hodnoty .....	67
	Příloha B – citlivostní analýza varianty I. A II. (RCF) a kumulované DCF .....	69

# 1. Úvod

Automobilový průmysl patří mezi nejdůležitější a nejvýznamnější průmyslová odvětví v České republice. Tvoří nepostradatelnou část české průmyslové výroby a zaměstnává téměř 4,5 % všech pracujících lidí. [1] Protože se jedná o velice rychle se rozrůstající odvětví, objevují se v něm stále nová témata a s tím i výzvy. Není tomu jinak ani u našeho největšího výrobce osobních automobilů ŠKODA AUTO a.s. Tato společnost se dlouhodobě snaží jít cestou udržitelného rozvoje, ale zároveň zůstat plně konkurenceschopná a prosperující. To obnáší mimo jiné snižování emisí formou využití elektrické energie k pohonu automobilů, vývoj efektivnějších technologických postupů nebo také vhodnou volbu a úsporu používaných materiálů. Uspořením i volbou materiálu nejen že snižujeme ekologickou stopu, ale také šetříme peníze, které samozřejmě jako v každé pracovní odvětví hrají nejdůležitější roli.

Jednou z oblastí v automobilce, ve které má právě úspora a volba použitého materiálu dominantní postavení, je vývoj elektrické instalace vozu. Pod tím si můžeme představit vývoj pojistkových konceptů, komponent elektrické instalace, zapojení a trasování elektrických svazků. Konkrétně u svazků elektrické instalace je dimenzování vodičů velmi důležité téma. Použití správného průřezu vodiče a vhodné izolace při velikosti objemu výroby šetří značné náklady.

Tato práce se zaměřuje právě na dimenzování vybraných typů vodičů elektrické instalace osobních automobilů. Dimenzování průřezů vodičů se řídí podle normy, kterou musí každý vodič daného průřezu splňovat, aby nedošlo k jeho poškození nebo poškození samotného vozidla. Chtěl bych zjistit, s pomocí vybraných průřezů vodičů používaných ve vozech ŠKODA, zdali tyto vybrané vodiče splňují danou interní normu a jak jsou dimenzovány. Vycházím z předpokladu, že daná norma ustanovující mimo jiné maximální dovolený zátěžný proud procházející trvale daným průřezem vodiče je nastavena příliš přísně a jednotlivé vodiče tedy budou předdimenzované, nebo jinými slovy, bude možné je zatížit větším maximálním trvalým proudem, než jaký norma udává, aniž by došlo k jejich jakémukoliv poškození.

Cílem této bakalářské práce je nejprve provést rešerši v oblasti používaných materiálů k výrobě vodičů. Následně provést měření na vybraných průřezech vodičů v různých teplotách okolí potřebná k tomu, aby bylo možné porovnat fyzikální chování ohřívaného vodiče s hodnotami z příslušné normy. Na základě tohoto porovnání vyvodit závěry pro jednotlivé průřezy a popsat postup a předpoklady, dle kterých by bylo možné nahradit silnější průřezy vodičů průřezy slabšími. Závěrečným cílem práce je z pohledu automobilky ekonomicky zhodnotit technický návrh redukce průřezů vodičů, tedy provést ekonomické zhodnocení investice do konkrétního návrhu redukce průřezů na základě všech nákladů a úspor.

## 2. Kritéria pro dimenzování vodičů

Při návrhu vodičů používaných v osobních automobilech (tím rozumíme volba správného druhu vodiče a použití vhodné izolace a průřezu) musíme vzít v úvahu několik hledisek, díky kterým vodič bude správně plnit svou funkci. Mezi nejdůležitější hlediska patří: [2]

- dovolená provozní teplota (proudová zatížitelnost)
- mechanické namáhání
- povolený úbytek napětí
- správná funkce jištění
- optimální dimenzování průřezů (hospodárnost)
- účinky zkratových proudů

### 2.1. Dovolená provozní teplota (proudová zatížitelnost)

V této práci se zabývám dimenzováním vodičů z hlediska jejich dovolené provozní teploty. Tato teplota omezuje maximální dovolené proudové zatížení vodiče. Jelikož materiál vodivého jádra vodiče vydrží mnohem vyšší provozní teplotu než materiály používané k výrobě izolací, je tato dovolená teplota dána právě použitou třídou izolace. Při dlouhodobějším nedovoleném tepelném namáhání by izolační materiál ztrácel svoje vlastnosti a zkracovala se tím tak jeho životnost.

Při určování maximální proudové zatížitelnosti konkrétního vodiče vycházíme z bilanční rovnice tepelných výkonů na jeden metr vodiče. Jedná se o diferenciální rovnici, jejímž součtem výkonů na pravé straně dostaneme výkon akumulující tepelnou energii ve vodiči.[3]

$$M \cdot C_p \cdot \frac{dT_V}{dt} = P_j - P_r - P_k \quad (1)$$

M	poměrná hmotnost vodiče [kg.m <sup>-1</sup> ]
C <sub>p</sub>	měrná tepelná kapacita vodiče [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
T <sub>v</sub>	teplota vodiče [°C]
P <sub>j</sub>	Jouleovy ztráty [W.m <sup>-1</sup> ]
P <sub>r</sub>	výkon odvedený radiací [W.m <sup>-1</sup> ]
P <sub>k</sub>	výkon odvedený konvekcí [W.m <sup>-1</sup> ]

Za předpokladů, že nedochází k nucené konvekci a proud protékající vodičem spolu s okolní teplotou jsou konstantní, je časová změna teploty vodiče nulová a rovnici můžeme vyjádřit ve tvaru:

$$P_j = P_r + P_k \quad (2)$$

Což jednoduše znamená, že teplo vzniklé se musí rovnat teplu odevzdanému. [3]

### 2.1.1. Jouleovy ztráty

Jouleovy ztráty jsou nejvýznamnějším zdrojem tepla ohřívající vodič. Jsou vyvolané průchodem elektrického proudu vodičem. Závisí na první mocnině elektrického odporu a na druhé mocnině procházejícího proudu. [3]

$$P_j = R \cdot I^2 \quad (3)$$

Elektrický odpor kovů s rostoucí teplotou stoupá v důsledku zvětšeného počtu srážek elektronů s krystalovou mřížkou kovu (elektron fononová interakce) podle vztahu:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \quad (4)$$

R	odpor vodiče při dané teplotě [ $\Omega$ ]
R <sub>0</sub>	odpor vodiče při počáteční teplotě [ $\Omega$ ]
$\alpha$	teplotní součinitel odporu při 20 °C [ $K^{-1}$ ] (pro měď = $3,9 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ , pro hliník = $4,0 \cdot 10^{-3} K^{-1}$ )
$\Delta\vartheta$	teplotní rozdíl [K]

Elektrický odpor vodiče lze vyjádřit s pomocí jeho vlastností, jakými jsou průřez vodivého jádra, délka a rezistivita (měrný odpor):

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (5)$$

R	odpor vodiče [ $\Omega$ ]
$\rho$	měrný elektrický odpor (rezistivita) [ $\Omega \cdot m$ , $\Omega \cdot mm^2/m$ ] (pro měď $\rho = 0,0178 \Omega \cdot mm^2/m$ )
l	délka vodiče [m]
S	průřez vodivého jádra vodiče [ $mm^2$ ]

### 2.1.2. Výkon odvedený konvekcí

Konvekci můžeme rozdělit na volnou a nucenou. K volné konvekci dochází pouze v důsledku rozdílu teplot vodiče a okolního vzduchu, zatímco u nucené konvekce vyvolává proud vzduchu vítr. Tyto skutečnosti zohledňuje součinitel přestupu tepla. Odváděný výkon konvekcí můžeme určit ze vztahu:[3]

$$P_k = \delta \cdot (T_v - T_A) \quad (6)$$

$\delta$	součinitel přestupu tepla [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]
$T_v$	teplota vodiče [ $^{\circ}C$ ]
$T_A$	teplota okolí [ $^{\circ}C$ ]

### 2.1.3. Výkon odvedený radiací

Radiace, též sálání, je druhý způsob, jakým dochází k ochlazení vodiče. Hodnota tohoto výkonu při daných provozních podmínkách je však proti konvekci zanedbatelná. Koeficient emisivity je závislý na povrchu vodiče a je velice těžké ho určit, proto se velmi často používá hodnota stanovená normou. Výkon odvedený radiací lze určit podle následujícího vztahu:[3]

$$P_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_v^4 - T_A^4) \quad (7)$$

$\varepsilon$	emisivita povrchu vodiče [-]
$\sigma$	Stefan – Boltzmanova konstanta
$T_v$	teplota vodiče [°C]
$T_A$	teplota okolí [°C]

#### 2.1.4. Výpočet proudové zatížitelnosti

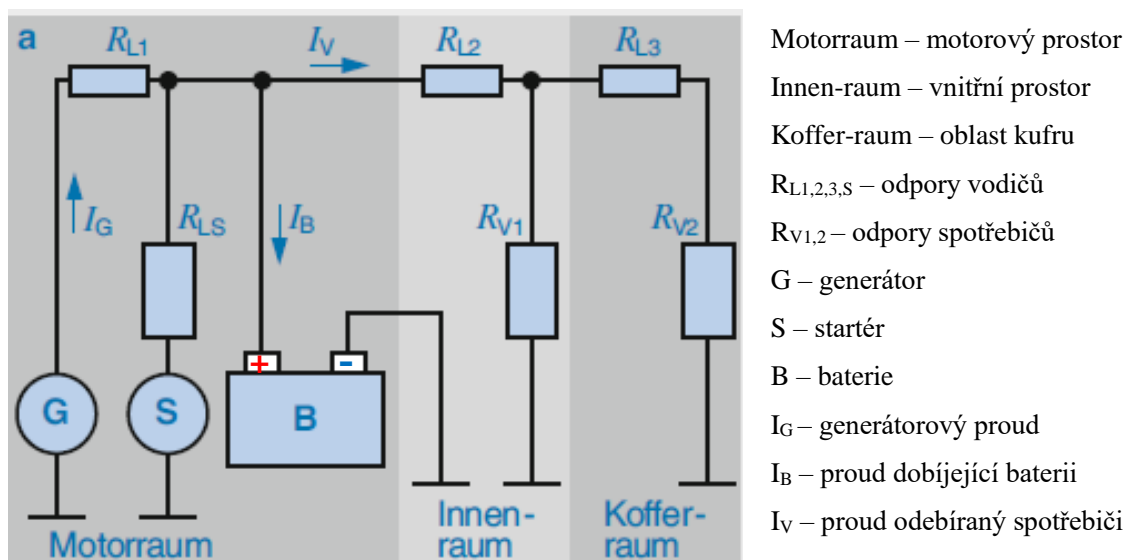
Po vypočtení tepelných výkonů  $P_r$  a  $P_k$  uvedených v přechozím textu můžeme ustálený provozní proud vypočítat z následujícího vztahu:[3]

$$I = \sqrt{\frac{P_k + P_r}{R}} \quad (8)$$

### 3. Vlastnosti elektroinstalace v automobilu

Vodiče obecně v motorových vozidlech jsou součástí většího celku, který ve voze můžeme označit jako elektroinstalace. Ta se mimo vodičů skládá z konektorů, pojistek, spínačů, přepínačů, přerušovačů, relé apod. Jejím cílem je především spojovat zdroje elektrického proudu (akumulátor, alternátor, palivové články) s elektrickými spotřebiči (zapalování, žhavení, osvětlení, klimatizace, palubní přístroje, řídicí a diagnostické jednotky, centrální zamykání atd.).[4]

Elektroinstalace v automobilech je prováděna tzv. jednovodičovou formou. To znamená, že většina elektrických spotřebičů je napájena ze zdroje elektrické energie jedním vodičem a proudový okruh se uzavírá přes kostru vozidla. Proto je velmi důležité správné ukostření všech spotřebičů. Z praktických i technických důvodů je ukostřován převážně záporný pól baterie. Tuto skutečnost zobrazuje i následující schematický obrázek.[5]



Obrázek 1: Elektroinstalace v automobilu – jednovodičová metoda [5]

Ve většině případů se vodiče elektroinstalace v automobilu stahují do svazků. Využívají se k tomu různé druhy stahovacích pásek a různé techniky omotání. V některých oblastech jsou použity i plastové trubky, hadičky nebo kanály. Uspořádání vodičů do svazků má svoje důvody. Je ekonomicky výhodnější při montáži automobilu pracovat s celým svazkem než instalovat každý z vodičů zvlášť. Další výhodou je přehlednost instalačního procesu a také snazší značení. V neposlední řadě svazky omezují možnost poškození jednotlivých vodičů, protože ty jsou lépe fixovány v určených polohách a cestách. Nevýhodou je případná oprava jednoho z vodičů.[6]



Na následujících obrázcích jsou svazky vodičů. Svazky jsou omotány textilní a ořezuvzdornou páskou, a to buď spirálním ovínem, nebo plným ovínem. Dále jsou vidět plastové příchytky a klipy, kterými jsou svazky ve vozidle připevněny. Svazky se většinou rozvětvují. V tomto případě můžeme vidět vývody kostřících vodičů, antén a svorkovnici. Na prvním obrázku je také vidět použití hadičky přímo ve svazku.



Obrázek 2: Svazek vodičů [interní materiál ŠA]



Obrázek 3: Svazek vodičů [interní materiál ŠA]

## 4. Popisování typů vodičů

Správný a jednoduchý popis vodiče je velmi důležitý, protože nám poskytne celou informaci o typu vodiče včetně typu použitého materiálu jádra a izolace. Pro přehlednost a názornost slouží následující příklad a tabulka (nejedná se o plný výčet všech možností, pouze o nejpoužívanější množinu):

Tabulka 1: Popisování vodičů [7]

<b>Typ vodiče</b>	automobilový vodič	FL
<b>Materiál vodivého jádra</b>	hliník	AL
	ostatní materiály	M
	měď	CU
	měděné slitiny	CU "xx"
	hliníkové slitiny	AL "xx"
<b>Tloušťka izolace</b>	ultratenká izolace	U
	redukovaná izolace	R
	silnostěnná	-
	ultrasilná	S
<b>Materiál izolace</b>	měkčené PVC	Y
	polyetylen – PE	2Y
	tetrafluoretylen – FEP	6Y
	polypropylen – PP	9Y
	polyeterpolyuretan – TPE – E	12Y
<b>Speciální konstrukční prvky</b>	opletení měděným drátkem	C
	opletení skleněným vláknem	G
	textilní opletení	T
<b>Nominální průřez vodiče a konstrukce</b>	symetrická struktura	A
	asymetrická struktura	B
<b>Speciální designové úpravy</b>	plochý vodič	F
	vícežilný vodič	Z
<b>Povrchová úprava vodiče</b>	cínovaný	SN
	niklovaný	NI
	postříbřený	AG

Tabulka 2: Příklad popisu vodiče [7]

<b>FLCUAGO1RY 0.13NI-A</b>	
automobilový vodič	FL
vodivé jádro ze slitiny mědi a stříbra 0,1 %	CUAG01
redukovaná tloušťka izolace	R
izolace z měkčeného PVC	Y
nominální průřez vodiče 0,13 mm <sup>2</sup>	0.13
poniklovaný povrch vodivého jádra	NI
symetrická struktura vodiče	-A

## 5. Materiály používané k výrobě jader vodičů v osobních automobilech

V osobních automobilech se k výrobě vodivých jader vodičů využívá celá řada materiálů, jejichž výběr podléhá normám ČSN P CEN/TS 13388 (421301) a ČSN EN 573-3, které pojednávají o kvalitativních vlastnostech mědi a hliníku a jejich slitin. Mezi nejdůležitější zástupce patří tedy měď a hliník. Tyto kovy se používají takřka vždy, a to buď v čisté podobě, či v podobě slitiny s ostatními materiály. Těmi mohou být například stříbro, hořčík nebo cín. Záleží na tom, k jaké aplikaci vodič chceme využít, a tedy jaké vlastnosti vyžadujeme. Tato jádra bývají často pokovována dalším prvkem, a to kvůli lepší pájitelnosti, vyšší odolnosti proti korozi, lepšímu odvodu tepla a lepší povrchové vodivosti (skin efekt).[7]

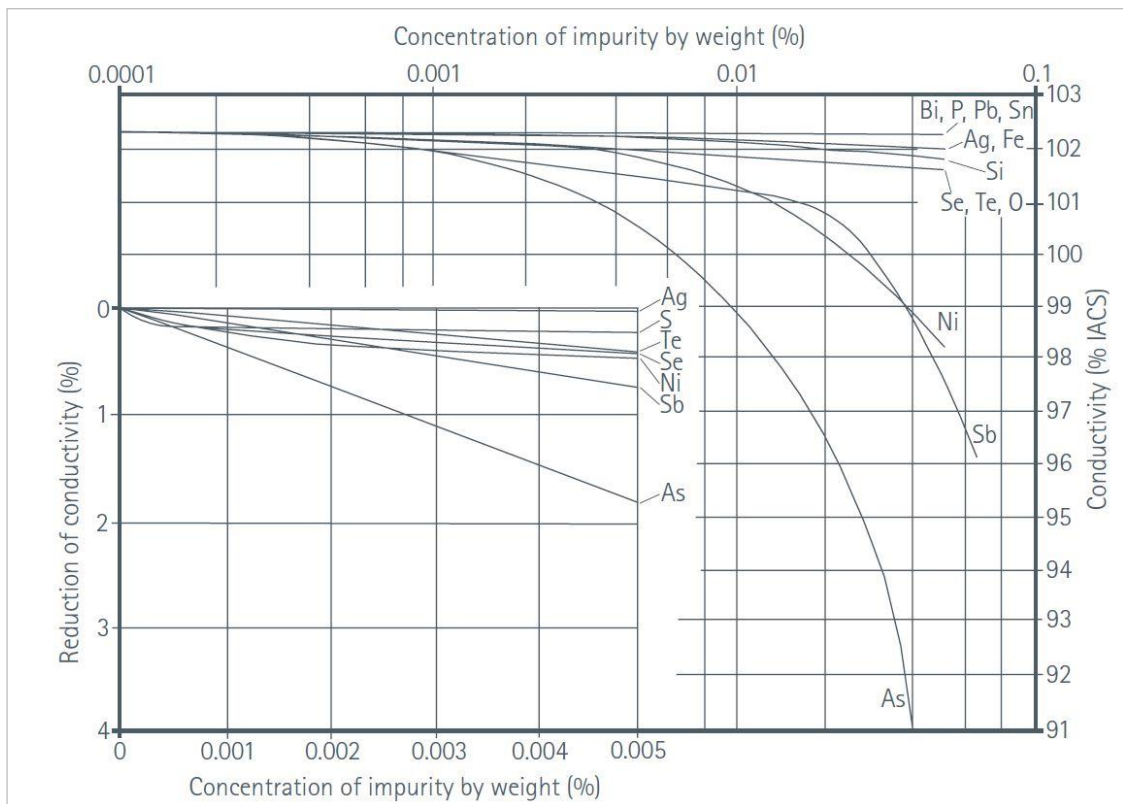
### 5.1. Měď

Nejvíce používaným materiálem pro výrobu vodivých jader vodičů je měď. To je dáno především jejími přednostmi. Mezi ně řadíme tažnost a tvárnost, dobrou pevnost, jednoduché spojování a odolnost proti korozi. V automobilovém průmyslu se používá jak měď samotná, tak její slitiny. Nejčastěji se jedná o žíhanou kyslíkatou měď Cu – ETP (Electrolytic Tough Pitch), v hmotnostním poměru měď  $\geq 99,90\%$  a kyslík max.  $0,040\%$ . Používá se zejména pro svou výbornou elektrickou vodivost  $58 \cdot 10^6$  S/m při  $20\text{ }^\circ\text{C}$ . Tato hodnota je i mezinárodním standardem a používá se jako vztažná pro procentní vyjádření vodivosti materiálů. To tedy znamená, že elektrická vodivost mědi  $58 \cdot 10^6$  S/m =  $100\%$  IACS (International Annealed Copper Standard).

Další důležitou vlastností mědi je mechanická pevnost v tahu  $>220$  N/mm<sup>2</sup> a odolnost proti střídavému ohybu. To umožňuje využití měděných vodičů i v ohybem namáhaných částech automobilů, což je jedna z hlavních výhod oproti vodičům hliníkovým. Cena se dlouhodobě pohybuje okolo  $5,5$  €/kg.

Obsah kyslíku, jakožto dopantu, je velmi důležitý a během zpracování čisté mědi je jeho obsah sledován. Přítomnost nečistot v mědi či její slitině snižuje elektrickou vodivost, avšak použitím kyslíkaté mědi se s tímto problémem můžeme alespoň částečně vypořádat. Nečistoty vytvářejí spolu s kyslíkem oxidy, které existují uvnitř dané látky jako inkluze. Tím, že již nečistoty nejsou vázány přímo na krystalickou mřížku mědi, je jejich negativní účinek na vodivost snížen. Množství obsaženého kyslíku v mědi však nesmí překročit určitou hranici. Prvním důvodem je, že samotný prvek tvoří s mědí částice oxidu měďnatého, které snižují elektrickou vodivost. Druhým důvodem stanovení hranice množství kyslíku v mědi je, že vysoký obsah kyslíku může vést k tzv. vodíkové křehkosti. Tímto pojmem označujeme proces, kdy z důvodu nedostatečné ochranné atmosféry nebo oxidace povrchu kovu difunduje vlivem zvýšené teploty

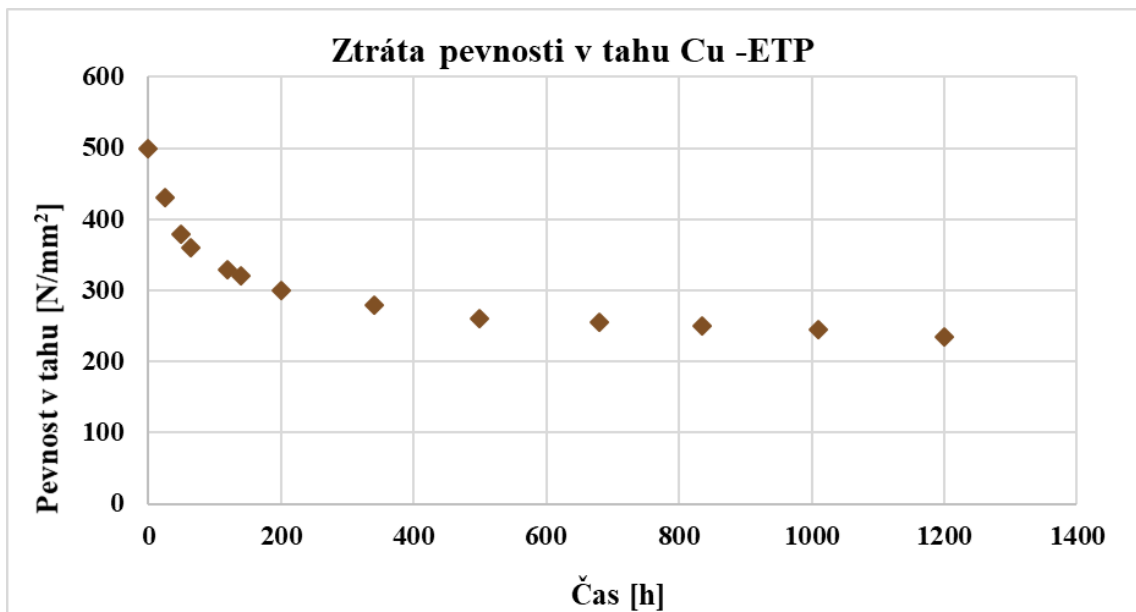
(např. při svařování) do svaru vodík. Ten po čase rekombinuje, zvětší svůj objem a v materiálu vznikají vnitřní napětí. Při zatížení svaru pak dochází k jeho praskání.



Obrázek 4: Vliv některých nečistot na elektrickou vodivost Cu – ETP [8]

Označením „tough pitch copper“ rozumíme flexibilní, tvárnou a houževnatou měď. Těchto vlastností je dosaženo při procesu přetavení. Kyslík reaguje s vodíkem, který je odebírán z atmosféry pece, a vytváří páru na povrchu zahřívaného materiálu. Tímto zabráníme rychlému smršťování povrchu materiálu, ke kterému by při tuhnutí jinak docházelo, a také následným vnitřním pnutím. Tímto zpracováním odstraňujeme také pórovitost.

Použití čisté mědi má však svá úskalí, a proto ji nelze použít k výrobě všech typů vodičů. Potýkáme se u ní s problémem pevnosti v tahu. I při pokojových teplotách dochází u tvrzených měděných vodičů k rekrytalizaci a k postupné ztrátě pevnosti v tahu. Tento problém neřeší ani použití tažné mědi, jelikož u ní ztratíme mechanickou pevnost. Proto se používají slitiny mědi s jinými prvky, které zaručí, že k rekrytalizaci dojde až při mnohem vyšších teplotách a zachovávají si tak lepší pevnost v tahu ve větším rozsahu teplot. Zmiňovanou skutečnost demonstruje následující obrázek.[7] [9]

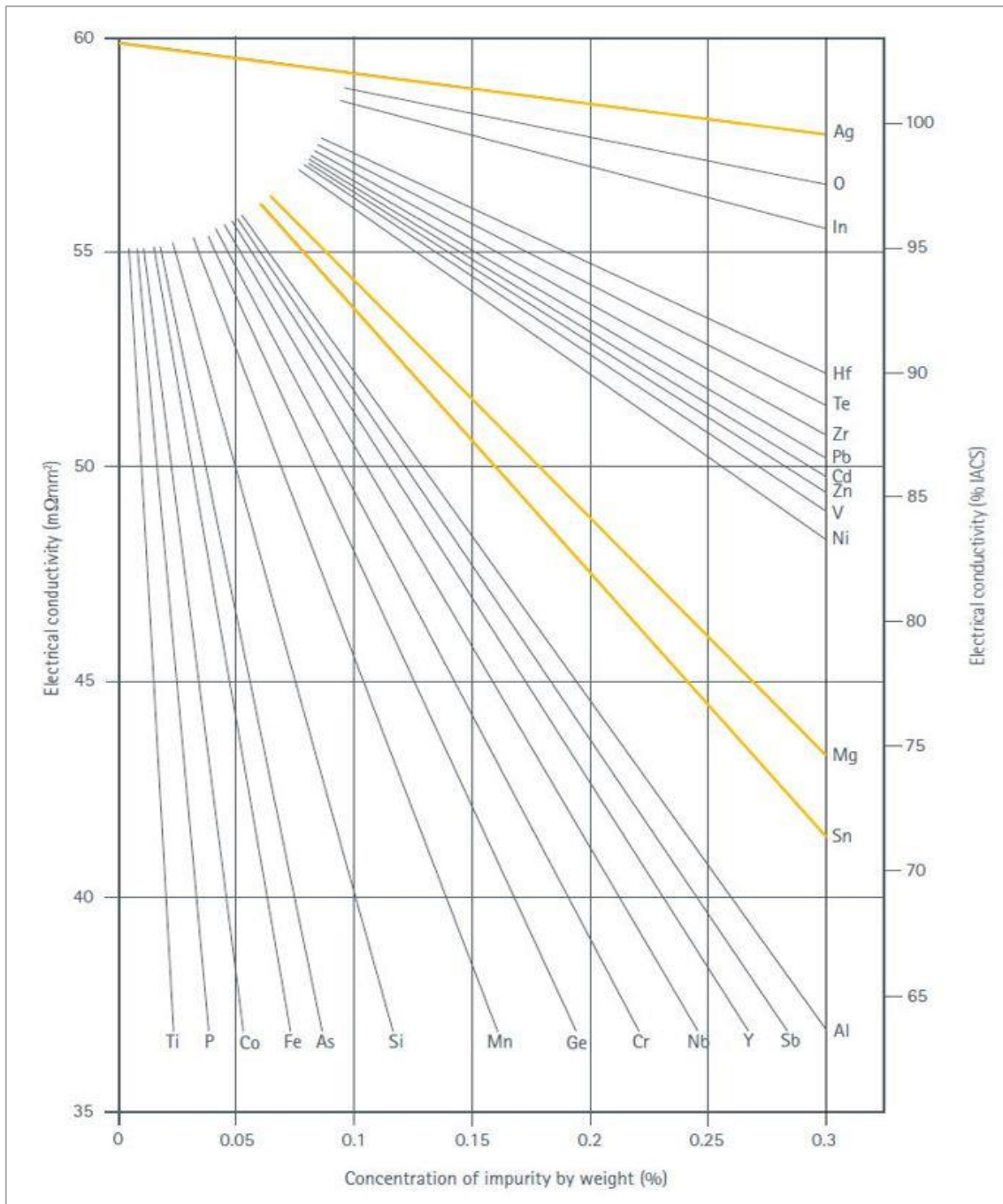


Obrázek 5: Změna pevnosti v tahu čistě mědi v závislosti na čase [10]

Zajímavé je si povšimnout, že i flexibilní a tvárná Cu-ETP ztrácí přibližně 40 % své pevnosti v tahu již po 200 hodinách. V dalších tisíci hodinách už pokles není tak markantní a po 1200 hodinách má měď přibližně poloviční pevnost v tahu než na počátku.

## 5.2. Slitiny mědi

Existuje na 400 měděných slitin. Každá má svoje unikátní vlastnosti a využití v různých aplikacích ve všech možných průmyslových odvětvích. Většina těchto slitin je recyklovatelná a může být po přetavení znovu použita. Nejčastějšími příměsemi ve slitinách mědi používaných k výrobě automobilových vodičů jsou stříbro, cín a hořčík, ale je možné se setkat i s niklem, berylliem či zinkem (nikl a beryllium jsou velmi drahé). Tyto slitiny se mimo jiné vyznačují větší mechanickou pevností a ohybovou odolností, než je tomu u čisté mědi, což je v jejich aplikacích požadováno. Na následujícím obrázku můžeme vidět vliv příměsí na elektrickou vodivost mědi. Žlutě vyznačené jsou slitiny mědi, které se používají v osobních automobilech nejvíce. [7, 11]



Obrázek 6: Vliv příměsí na elektrickou vodivost mědi [8]

### 5.2.1. Měď – stříbro (CuAg)

Slitina mědi se stříbrem se používá k výrobě vodičů, u kterých je žádoucí velká mechanická pevnost a zároveň i zachování původní elektrické vodivosti vodiče. V automobilovém průmyslu se využívá slitin v hmotnostním poměru příměsí stříbra od 0,08 do 0,12 %. Elektrická vodivost těchto slitin je minimálně 98 % IACS při 20 °C. Díky pevnosti v tahu, která je >540 N/mm<sup>2</sup>, můžeme z těchto slitin vyrábět vodiče slabších průřezů, tzn. průřezy 0,17 mm<sup>2</sup> a 0,13 mm<sup>2</sup>.

Vodiče o menších průřezích mají menší proudovou zatížitelnost a hodí se tedy především pro výrobu datových (signálních) vodičů. Pro představu, odpor vodiče CuAg01 0.13 má odpor 145 m $\Omega$ /m, což je přibližně 2,5x více, než odpor vodiče FLRY 0.35. Nevýhodou tohoto typu vodiče je jeho vyšší cena, která je daná nákupní cenou stříbra. [7, 12, 13]

### **5.2.2. Měď – hořčík (CuMg)**

Stejně jako u slitiny CuAg se i u této využívá výrazně větší mechanické pevnosti v tahu a zvýšené odolnosti v ohybu. Ta dosahuje hodnot  $>670$  N/mm<sup>2</sup>. Pro osobní automobily se vyrábějí vodiče s hmotnostním poměrem hořčíku od 0,14 do 0,26 %. S elektrickou vodivostí je to u těchto slitin horší, minimální garantovaná hodnota je 75 % IACS. Výhodou je snížení teplotního koeficientu odporu a také možnost využití této slitiny k výrobě slabších průřezů vodičů a díky tomu snížení hmotnosti vozu. Například k dosažení pevnosti v tahu 70N u vodiče z čisté mědi bychom potřebovali průřez 0,35 mm<sup>2</sup>, zatímco pokud využijeme CuMg, stačí nám i vodič průřezu 0,13 mm<sup>2</sup>. [5, 11, 12]

### **5.2.3. Měď – cín (CuSn)**

Poslední z hojně využívaných slitin mědi v automobilovém odvětví je CuSn. Hmotnostní poměr cínu ve slitině se pohybuje v rozmezí od 0,25 do 0,35 %. Opět i zde se využívá větší mechanické pevnosti  $>620$  N/mm<sup>2</sup> a vyšší ohybové odolnosti, i proto se tato slitina nejvíce využívá u vodičů namáhaných ohybem a vibracemi. Garantovaná elektrická vodivost musí být 72 % IACS a vyšší. I tato slitina se používá k výrobě nejtenčích vodičů. Protože je slitina CuMg na trhu nedostatkovým zbožím a také se hůře technologicky zpracovává, využívá se k výrobě tenkých vodičů spíše slitina CuSn. [7, 16, 17]

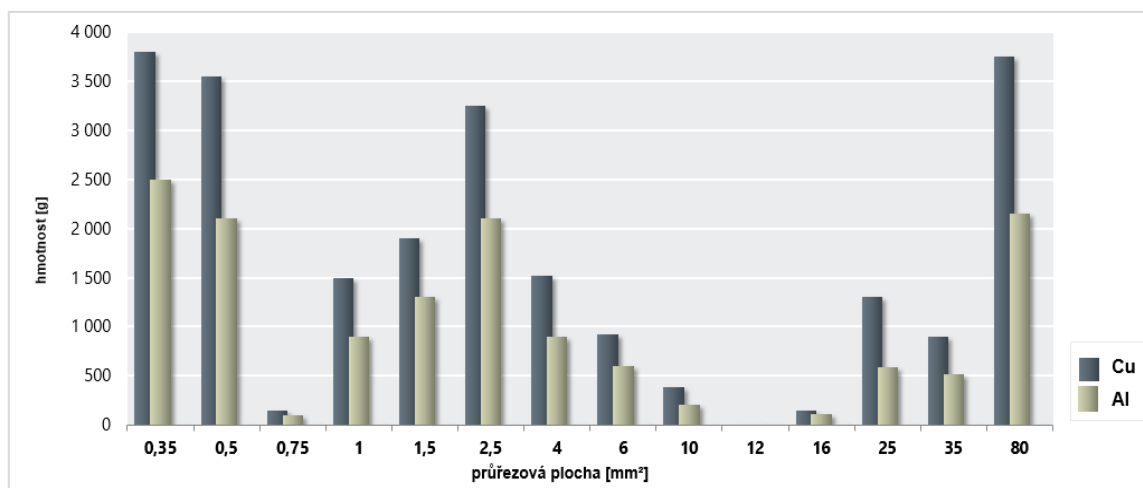


### 5.3. Hliník

O alternativě k mědi, hliníku, se v poslední době začíná velmi silně uvažovat. Automobilky k tomu žene hlavně snaha o co nejmenší hmotnost vozů a také stále dlouhodobě rostoucí ceny mědi. Hliníkové vodiče se používají pro automobilový průmysl v čistotě materiálu 99,7 %. Na rozdíl od mědi a jejích slitin nedisponuje hliník tak dobrými elektrickými vlastnostmi, a proto je elektrická vodivost těchto vodičů minimálně 62 % IACS při 20 °C. To znamená, že abychom dosáhli stejné vodivosti jako u mědi, musí být průřez hliníkového vodiče přibližně o 60 % větší. I přesto však dochází k úspoře hmotnosti, protože hliník má přibližně třikrát menší hustotu než měď. Dále také ušetříme finance, protože cena hliníku se pohybuje okolo 1,7 €/kg, zatímco měď okolo již zmíněných 5,5 €/kg. Nevýhodou hliníku jsou jeho mechanické vlastnosti. Menší pevnost v tahu  $100 \text{ N/mm}^2$  ( $\text{Cu} - \text{ETP} > 220 \text{ N/mm}^2$ ) a větší křehkost nedovoluje použít hliníkové vodiče v místech, kde dochází k opakovaným ohybům či vibracím. Další negativní vlastností hliníku je jeho tečení při zvětšeném tlaku. Při kontaktování je potřeba použít dostatečně pružné kontakty, jinak hrozí ve spojení s dalšími vlivy (vlhkost, rozdílná teplotní roztažnost hliníku a svorky/kontaktu) k uvolnění vodiče ve svorce a tím k nadměrnému zvětšení přechodových odporů ve spoji s následným nadměrným zahříváním, případně oxidací. Pozor je třeba dávat i na vzdušnou vlhkost, jejímž vlivem dochází k oxidaci obnažených částí vodiče. Na povrchu jádra vodiče se vytvoří tenká vrstva oxidu hlinitého  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Tato vrstvička sice zabraňuje další korozi, ale výrazně zvětšuje přechodový odpor spoje. Je proto nutné vodivé obnažené jádro před kontaktováním/nalisováním důkladně očistit. Hliníkové vodiče v osobních automobilech jsou aplikovány převážně ve větších průřezích, kde je úspora hmotnosti vůči mědi největší (např. vodiče k baterii). V grafu č. 1 je vidět porovnání sum hmotností vodičů jednotlivých průřezů ve voze. Jsou zde uvedeny sumy hmotností v současnosti používaných měděných vodičů a také potenciálně využitelných hliníkových. [7, 18]

Slitiny hliníku se k výrobě vodičů ani obecně v automobilech příliš nevyužívají. Za zmínku stojí slitina s železem a hořčíkem  $\text{AlFeMg}$ , která se používá nejen v automobilovém, ale i leteckém průmyslu. S příchodem nových technologických postupů, a tedy zlevňováním těchto slitin, se to však může změnit. Dnes již existují a stále se vyvíjejí kvalitní hliníkové slitiny, které by v osobních automobilech mohly v budoucnosti najít své využití. [19]

Graf 1: Porovnání hmotností vodičů jednotlivých průřezů v automobilu [interní materiál ŠA]



Při přepočtení hmotností na délku vodiče dostaneme sumu délek všech vodičů stejného průřezu. To znamená, že podle tohoto grafu se ve voze nachází přibližně:

- 815 m vodiče průřezu 0,35 mm<sup>2</sup>
- 550 m vodiče průřezu 0,5 mm<sup>2</sup>
- 125 m vodiče průřezu 1 mm<sup>2</sup>
- 113 m vodiče průřezu 1,5 mm<sup>2</sup>
- 115 m vodiče průřezu 2,5 mm<sup>2</sup>
- 31 m vodiče průřezu 4 mm<sup>2</sup>
- 4,5 m vodiče průřezu 80 mm<sup>2</sup>

Tento výčet je pouze pro vybrané průřezy vodičů. Po sečtení všech délek všech průřezů dostaneme délku všech vodičů v jednom voze, která je přibližně 1800 m.

## 5.4. Porovnání materiálů – charakteristiky

Tabulka 3: Porovnání materiálů – charakteristiky [7]

	Cu – ETP	CuAg	CuMg	CuSn	Al
Elektrická vodivost	≥100 % IACS	≥98 % IACS	≥75 % IACS	≥72 % IACS	≥62 % IACS
Pevnost v tahu	>220 N/mm <sup>2</sup>	>540 N/mm <sup>2</sup>	>670 N/mm <sup>2</sup>	>620 N/mm <sup>2</sup>	100 N/mm <sup>2</sup>
Cena surovin <sup>1</sup>	5,50 €/kg	5,93 €/kg	5,49 €/kg	5,54 €/kg	1,69 €/kg
Teplota tání	1 083 °C	1 083 °C	1 078 °C	1 065 °C	659 °C
Hustota	8,9 g/cm <sup>3</sup>	8,9 g/cm <sup>3</sup>	8,9 g/cm <sup>3</sup>	8,9 g/cm <sup>3</sup>	2,7 g/cm <sup>3</sup>

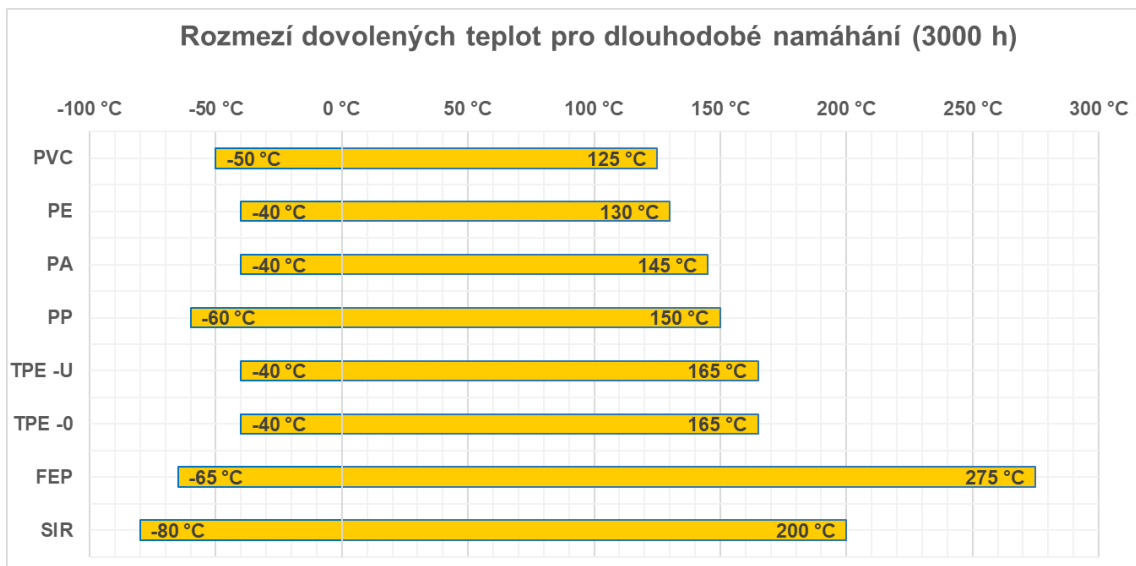
<sup>1</sup> Jedná se o přibližné nákupní ceny surovin na evropském trhu – aktuální k datu 25. 4. 2019.

## 6. Materiály používané k výrobě izolací vodičů v osobních automobilech

Pod pojmem elektrický izolant si zjednodušeně můžeme představit látku, která nevede elektrický proud. Avšak není to zdaleka jediné kritérium, které musí splňovat. Stejně jako v jiných odvětvích i zde jsou na izolační materiály kladeny velké nároky. Každý takový materiál by měl mít vysokou rezistivitu, teplotní odolnost, elektrickou pevnost, dobré mechanické vlastnosti, měl by být lehký, nenavlhavý, odolný proti vnějším chemickým vlivům a snadno zpracovatelný. Všechny tyto vlastnosti by si měl uchovávat bez ohledu na okolní pracovní podmínky. Každý materiál má přesto odlišné vlastnosti, a proto musíme při výběru uvažovat nad tím, do jakých provozních teplot izolaci používáme, jaké proudy potečou jádru vodičů, jaký typ izolace používáme na vodiče umístěné v místech kinematického namáhání a jestli se jedná o suchý nebo mokrá prostor. Dále bychom měli vzít v potaz, s jakou látkou může izolace přijít do kontaktu. Podle toho volíme izolace odolné proti olejům, palivům, brzdové kapalině, kyselinám, silným zásadám a organickým činidlům. Přidáním některého z halogenů můžeme také ovlivnit hořlavost izolačního materiálu.[20]

K výrobě izolací pro osobní automobily se nejčastěji používají organické pevné vysokomolekulární izolanty (polymery), zejména termoplasty (amorfní nebo semikrystalické) a termoplastické elastomery (zesíťované plasty). Nejedná se o nijak novou záležitost, protože většina termoplastů byla vynalezena již ve 30. letech 20. století a jejich izolačních vlastností při výrobě vodičů se začalo využívat o 20 let později. Z termoplastů se používá konkrétně Polyvinylchlorid – PVC, Polyetylen – PE, Polypropylen – PP, Polyamid – PA a Tetrafluoretylen – FEP a z termoplastických elastomerů Polyeterpolyuretan TPE – U a Polyolefinelastomer TPE - O. Za zmínku ještě stojí samostatná skupina silikonů – SIR. Jednotlivé polymery se liší svými vlastnostmi, a tedy například i jednotlivá izolace disponuje jiným tepelným rozsahem použití. Pro představu, u termoplastických polymerů se pohybuje rozmezí teplot použití pro dlouhodobé namáhání (3000 h) v intervalu -40 až 125 °C, zatímco u skupiny izolantů Fluoropolymerů – FEP v rozmezí -65 až 210 °C. Tato skupina polymerů také disponuje nejlepšími vlastnostmi a odolává velmi dobře téměř všem chemickým látkám, se kterými může přijít do kontaktu. Tento materiál se používá k výrobě izolace třídy E a F, konkrétně v automobilu k izolaci jader vodičů v motorovém prostoru a v oblasti převodovky. Mimo vyjmenované typy se používá i dalších polymerních látek či různě modifikovaných typů výše zmíněných. [7, 21]

Pro větší přehlednost slouží následující obrázek č. 7, na kterém jsou vidět dovozené teplotní rozsahy pro různé typy izolací (pro dlouhodobé namáhání 3000 hodin).



Obrázek 7: Rozmezí dovolených teplot pro dlouhodobé namáhání (3000 hodin) [vlastní tvorba]

Jak je známo, u izolačních materiálů hraje velkou roli jejich elektrická pevnost. Ta je především ovlivněna tloušťkou materiálu. Příliš velká tloušťka může vést k tepelnému průrazu. Ten je důsledkem špatného odvodu tepla do okolí, kdy lokální termické porušení způsobí výrazný pokles izolačních vlastností. Elektrická pevnost musí být tím větší, čím slabší je použitá izolace. V automobilovém průmyslu se tedy v zásadě využívá 3 typů tlouštěk izolací podle toho, k jak velkému oteplení vodiče může dojít. U vodičů FLY se používá tloušťka izolace od 0,60 do 1,60 mm v závislosti na průřezu vodivého jádra. U typu FLRY se využívá izolace redukováne s tloušťkou od 0,20 do 0,52 mm. Jako poslední se používá typ FLUY s ultra tenkou izolací s tloušťkou od 0,16 do 0,2 mm opět v závislosti na průřezu vodivého jádra. Poslední zmíněný typ byl uveden na trh firmou Leoni v roce 2015. Je určen pro průřezy vodičů 0,35mm<sup>2</sup> až 2,5 mm<sup>2</sup> a v porovnání s FLRY činí úspora hmotnosti na izolačním materiálu přibližně 7 %. S redukcí se také sníží průměr samotného vodiče, a to přibližně o 11 %. V případě zavedení této izolace by mohla být úspora hmotnosti na vozidle až 1,5 kg. [7, 22, 23]

## 6.1. Polyvinylchlorid – PVC

Mezi nejvýznamnější představitele skupiny termoplastů a materiálů používaných pro izolaci vodičů nízkého napětí, patří Polyvinylchlorid neboli zkráceně PVC. Tepelný rozsah izolací vyrobených z PVC se pohybuje od  $-50$  do  $125$  °C / 3000 h a jedná se tedy o třídy izolací A, B a C. Jejich použití je široké, uplatňují se zejména u vodičů v kabelových svazcích. V osobních automobilech se více používá měkčené PVC – P pro jeho dobrou ohebnost a pružnost. Jeho rezistivita se pohybuje od  $10^{12}$  Ω.cm výše. Vlastnosti polymerů závisí především na jejich chemické struktuře, molekulové struktuře a nadmolekulární struktuře, která souvisí s uspořádáním makromolekul vůči sobě navzájem. Díky přítomným polárním atomům chloru v makromolekule je PVC samozhášivé a lehce navlhavé. Za běžných teplot okolí je pevné a stálé. Problémy nastávají při vyšších teplotách, kdy dochází k tzv. dehydrochloraci, tedy k ději, kdy se z makromolekuly PVC vlivem vyšších teplot uvolňuje chlorovodík. Proto se musí přidávat stabilizátory (ftaláty, adipáty), jejichž úkolem je zvýšit odolnost polymeru vůči vyšší teplotě a zároveň zpomalit degradační procesy, které jsou navíc urychlovány přídatnými změkčovadly (soli kovů – Cd, Pb, Ba, Ca<sup>2</sup>). Výhodou PVC je chemická odolnost proti zásadám, olejům a benzínu. [7, 24–26]

## 6.2. Polyetylen – PE

Dalším významným materiálem pro výrobu izolací vodičů je Polyetylen – PE. Stejně jako PVC ho řadíme do skupiny termoplastů. Polyetylen je výborné dielektrikum s vysokou elektrickou pevností a je nenavlhavý. U vodičů se využívá spíše jeho nízkohustotní formy PE - LD, která je vhodná pro teplotní rozsah od  $-40$  do  $90$  °C, tedy třídu izolace A. Tato forma je vhodná pro vodiče, protože je velmi houževnatá a dobře zpracovatelná. Vysoká teplota způsobuje jeho měknutí a příliš vysoká tepelný rozklad. Rezistivita je v porovnání s PVC vyšší, a to konkrétně  $>10^{16}$  Ω.cm. Nevýhodou polyetylenu je jeho dobrá hořlavost a také menší chemická odolnost vůči chemikáliím, jakými může být brzdová kapalina, organická činidla nebo olej. [5, 20–22]

## 6.3. Polyamid – PA

Mezi další zástupce termoplastů patří polyamidy. Své uplatnění nenašly jen v textilním, ale i v automobilovém průmyslu. Jejich použitelnost pro osobní automobily je v rozsahu teplot od  $-40$  do  $105$  °C při provozu 3000 h a jejich rezistivita je  $>10^{12}$  Ω.cm, využívají se tedy k výrobě izolací třídy B a pro výrobu vodičů vedoucích ke snímači hladiny paliva v nádrži. Jsou velmi odolné

---

<sup>2</sup> Podle směrnice RoHS 2002/95/EC je v Evropské unie již zakázané použití olova a kadmia.

proti abrazivům, oleji a palivům. Jedná se o silně polární termoplast. Přítomnost dusíku v řetězci makromolekuly způsobuje navlhavost tohoto materiálu. Vyznačují se vysokou teplotou tání a vysokou pevností. [7, 25, 26]

#### **6.4. Polyeterpolyuretan TPE-U**

Polyeterpolyuretan řadíme do kategorie termoplastických elastomerů. Oproti termoplastům má větší pružnost a vyšší rozsah teplot použití, konkrétně od -40 do 125 °C pro použití 3000 h, tedy hodí se pro výrobu izolací třídy C. V automobilu bychom tento izolační materiál mohli najít na napájecích vodičích světlometů a kabeláži nápravy. Rezistivita je nižší, „jen“ asi  $>10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ . Jeho velikou výhodou je odolnost proti abrazivům, olejům, palivům, brzdovým kapalinám, kyselinám i organickým číidlům. Je samozhášivý. [7, 25, 26]

#### **6.5. Silikony SIR**

Pod pojmem silikony či silikonové pryže si můžeme představit všechny organokřemičité sloučeniny, mezi nimiž mají největší význam polymery, u nichž jsou křemíkové atomy spojeny kyslíkovými atomy a zbylé valence jsou vázány na uhlovodíkové zbytky. Mezi dobré vlastnosti silikonů patří především tepelná odolnost a stálost a dále relativní nehořlavost, odolnost vůči UV záření a hydrofobnost. Silikony snášejí dlouhodobě teplotní rozsahy od -80 do 200 °C a hodí se k výrobě izolací třídy E a F. Ve vozidle bychom je našli v motorovém prostoru na vodičích vedoucích od alternátoru a baterie. Jejich rezistivita je taky velmi dobrá, a to konkrétně  $>10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ . Silikony jsou velmi odolné proti látkám, jakými jsou brzdová kapalina, kyseliny, paliva a organická číidla. [28]

## 7. Měření oteplení vodičů v různých teplotách okolí

Jedny z cílů této práce jsou zjistit, zdali není interní norma používaná pro dimenzování vodičů v automobilech ŠKODA nastavena příliš přísně, a také ověřit, zdali vybrané průřezy používaných vodičů vyhovují této interní automobilové normě (VW 75212 – dále jen norma). Daná norma nám říká, jaký maximální proud může téci daným průřezem vodiče s danou izolací při definovaných teplotách okolí, aniž by došlo k jeho trvalému poškození a ohrožení funkce jistištění. Jak již bylo uvedeno výše, tyto hodnoty maximálních trvalých zátěžných proudů jsou především omezeny právě třídou použité izolace.

Jak již bylo uvedeno v kapitole č. 2, existuje mnoho kritérií, podle kterých se vodiče dimenzují. Pro potřeby dalšího zkoumání ve své bakalářské práci jsem si vybral jedno z nich, kterým je dovolená provozní teplota neboli proudová zatížitelnost vodičů vzhledem k třídě použité izolace a teplotě okolí. Proto, abych toto kritérium mohl dále prozkoumat, je potřeba provést měření na vybraných vodičích různých průřezů.

### 7.1. Vybrané vodiče pro měření

Ke svému měření jsem si vybral nejčastěji používané průřezy vodičů od 0,35 mm<sup>2</sup> do 2,5 mm<sup>2</sup>. Výrobcem těchto vodičů je společnost Kablo Vrchlábí s.r.o., která je tradičním výrobcem vodičů pro osobní automobily. Dodává vodiče mimo jiné pro značky automobilů jako je KIA, Hyundai, Volvo, Jaguar, Ford nebo VW. Konkrétně jsem si vybral typ vodičů FLRY – měděné propojovací vodiče pro kabelové svazky různých průřezů s redukovanou PVC izolací třídy B, tedy s použitím (při 3000 h) do 105 °C. Výběr průřezů vodičů jsem volil tak, aby na sebe jednotlivé vodiče navazovaly vzhledem k paletě jejich vyráběných a dodávaných průřezů pro koncern VW. Pro přehlednost jsem použité vodiče vypsals z katalogového listu do tabulky i s jejich základními vlastnostmi, které splňují mezinárodní normu ISO - 6722. Tato norma se zabývá dimenzováním nízkonapěťových vodičů určených pro silniční vozidla včetně metod měření a požadavků na vodiče. [7]

Tabulka 4: Vybrané typy průřezů vodičů pro vlastní měření [29]

Nominální průřez [mm <sup>2</sup> ]	Počet drátků jádra	Maximální průměr jednoho drátku [mm]	Maximální průměr jádra [mm]	Maximální odpor jádra při 20 °C [mΩ/m]	Minimální tloušťka izolace [mm]	Hmotnost [g/m]
0,35	12	0,21	0,9	54,4	0,2	4,6
0,5	16	0,21	1,0	37,1	0,22	6,4
0,75	24	0,21	1,2	24,7	0,24	9,2
1	32	0,21	1,35	18,5	0,24	12,0
1,5	30	0,26	1,7	12,7	0,24	16,8
2,5	50	0,26	2,2	7,6	0,28	27,8

## 7.2. Popis měření

Cílem tohoto měření je zjistit závislosti teplot jader vodičů na zatěžovacím proudu pro různé průřezy vodičů při různých teplotách okolí, konkrétně jde o pokojovou teplotu (23±0,5) °C, dále 55 °C, 70 °C a 85 °C. Důležité jsou především maximální hodnoty proudů, při kterých dojde k takovému oteplení vodiče, které odpovídá povolené hodnotě teploty dané třídy použité izolace, v tomto případě se jedná o třídu B a hodnotu T = 105 °C. Z tohoto důvodu začínám měřit závislosti od hodnot proudů odpovídající přibližně 75 %  $I_{Z, MAX}$  uvedeného v normě. Délka izolované části vodiče je jeden metr.

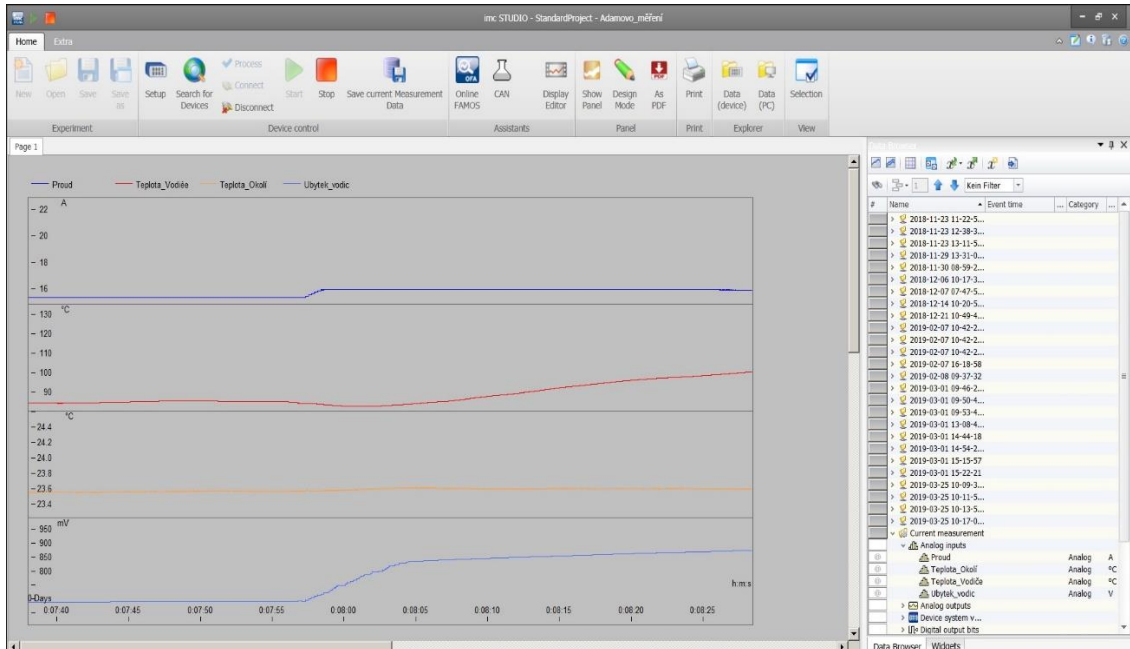
## 7.3. Postup měření a použité přístroje

Pro měření v pokojové teplotě jsem využil laboratoř, kde se teplota pohybuje okolo 23 °C (±0,5 °C). Aby bylo měření v pokojové teplotě průkaznější, simuloval jsem prostor bez proudění vzduchu poklopem, kterým byla přiklopena celá délka vodiče. Pro měření v teplotách okolí větších než je teplota okolí, jsem využil klimatické komory Weisstechnik Clima Event C/600/70/3, která umožňuje nastavit definovanou teplotu a udržovat ji po celou dobu měření s určitou nepřesností konstantní. Absolutní chyba nastavení teploty je ±0,5 °C a maximální relativní chyba při 55 °C je ±0,9 %. I zde jsem využil poklopu, aby byly podmínky měření pro všechny teploty shodné.

K měření jsem využil datalogger IMC CRONOSflex, který umožňuje sběr dat a jejich následné uložení do počítače. Nepřesnost sběru dat pomocí dataloggeru je 0,06 %. Všechna data jsou převáděna na vstupy sběrnice v jednotkách napětí, a proto je vždy potřeba znát převod z měřicího zařízení (termočlánky, proudová sonda). Data jsou ukládána se vzorkovací frekvencí 100 Hz a jejich průběh můžeme vidět v reálném čase na obrazovce počítače. Po skončení měření



je potřeba naměřená data odečíst z naměřených průběhů do přehledných tabulek. Následující obrázek ukazuje, jak probíhá měření veličin v reálném čase. Tmavě modrou barvou je znázorněn proud, červenou teplota vodivého jádra, žlutou teplota okolí a světle modrou barvou úbytek napětí na vodiči.



Obrázek 8: Pracovní prostředí softwaru IMC Studio s jednotlivými průběhy měřených veličin v reálném čase [interní materiál ŠA]

Teplotu jsem měřil termočlánky typu K (Chromel-Alumel) umístěnými pod izolaci vodiče, tedy měřil jsem teplotu přímo na jádru vodiče a poté na poklopu, kde je snímána teplota okolí. Takovéto měření teploty využívající Seebeckova jevu je velmi přesné a spolehlivé. Absolutní chyba takového měření s využitím sběru dat pomocí dataloggeru je  $\pm 0,85$  K a poměrná chyba při měření hraničních oblastí teplot  $\pm 0,8$  %.

Protože se jedná o malé odpory vodičů a mě zajímaly i úbytky napětí na vodičích, použil jsem pro měření čtyř vodičovou metodu, kdy jsou využity svorky pro měření napětí a svorky pro připojení vodiče k proudovému okruhu. Využil jsem 12V zdroje napětí od firmy TCE, ke kterému je připojena aktivní zátěž KIKUSUI Electronic Load PLZ 1004W v sérii s měřeným vodičem. Na aktivní zátěži poté lze přímo nastavovat požadovanou hodnotu zátěžného proudu a odečítat z displeje jeho hodnoty. Nastavení požadovaného proudu je zatíženo nepřesností  $\pm 0,02$  A, a tedy největší poměrné chyby (při měření nejmenších proudů) je dosaženo  $\pm 0,3$  %.

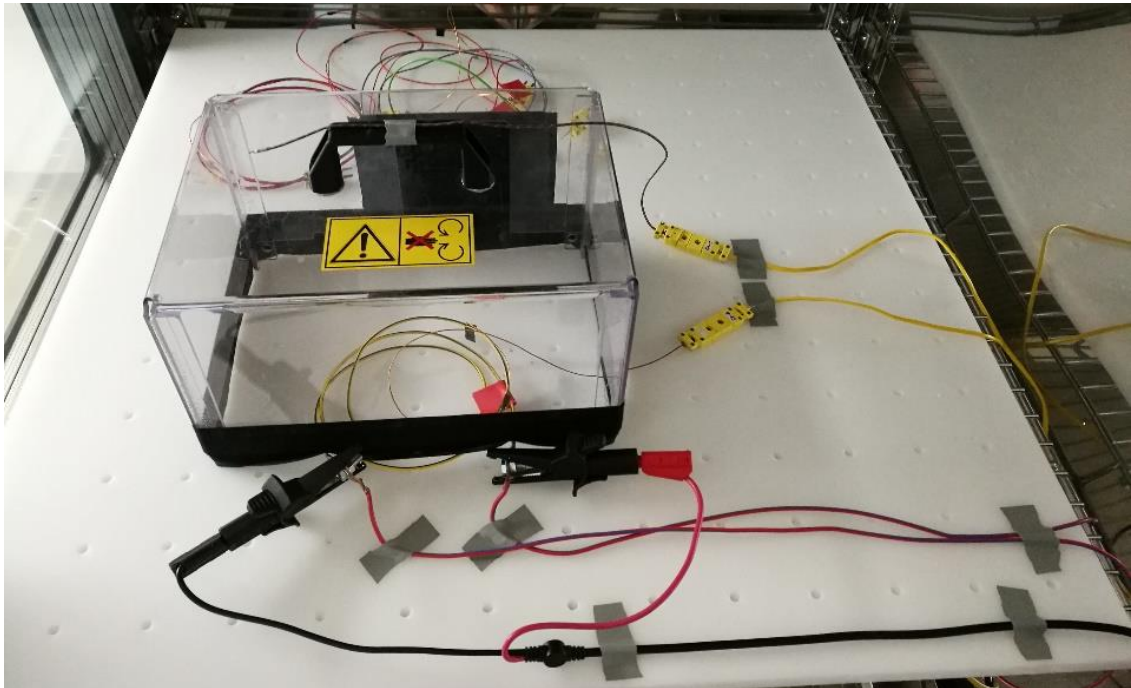
Měření jsem vždy provedl pro každý vodič zvlášť. Každý vodič musí být před samotným měřením dostatečně dlouho v klima komoře vytemperován na požadovanou teplotu okolí, aby nebylo měření zkresleno neustálenou teplotou okolí, a jeho přívodní kontakty musí být ošetřeny KONTAKTOLEM, tedy přípravkem pro odstranění zoxidovaných a sulfidových vrstev z elektrických kontaktů. Po ustálení teploty (především v klima komoře) jsem nastavil na aktivní zátěži hodnotu proudu přibližně 75 %  $I_N$ . Vždy je třeba čekat do ustálení teploty a až následně opět zvýšit zatěžovací proud. Proudové kroky jsem volil s ohledem na průřez vodiče a také nastavenou teplotu okolí. Jednalo se z počátku o kroky 2–3 A s tím, že čím blíže jsem se přibližoval k hraniční teplotě 105 °C, tím jsem kroky snižoval až na 0,5 A, aby došlo ke zpřesnění výsledků v hraniční oblasti.

Toto měření jsem provedl pro všechny zvolené vodiče a výše uvedené teploty okolí. Z naměřených dat, která jsou zaznamenána v počítači a která jsem si zpracoval pomocí softwaru dodávaném k dataloggeru IMC Studio, jsem sestavil tabulku hodnot teplot, proudů a úbytků napětí, z nichž lze vyčíst závislosti teplot vodičů na proudovém zatížení a teplotě okolí a také co je podstatné, závislost maximálního dovoleného zátěžného proudu vodiče při definovaných teplotách okolí. Jedná se tedy o takový proud, který může trvale protékat vodičem, aniž by teplota vodiče při dané teplotě okolí nepřesáhla hodnotu 105°C. Z důvodu rozsáhlosti jsou tabulky s naměřenými daty přiloženy v příloze.

Jelikož je relativní chyba měření zanedbatelná (< 1 %), neměly by být výsledky měření touto chybou nijak zásadně ovlivněny a nemělo by to mít vliv na následná rozhodnutí.

## 7.4. Měřicí pracoviště

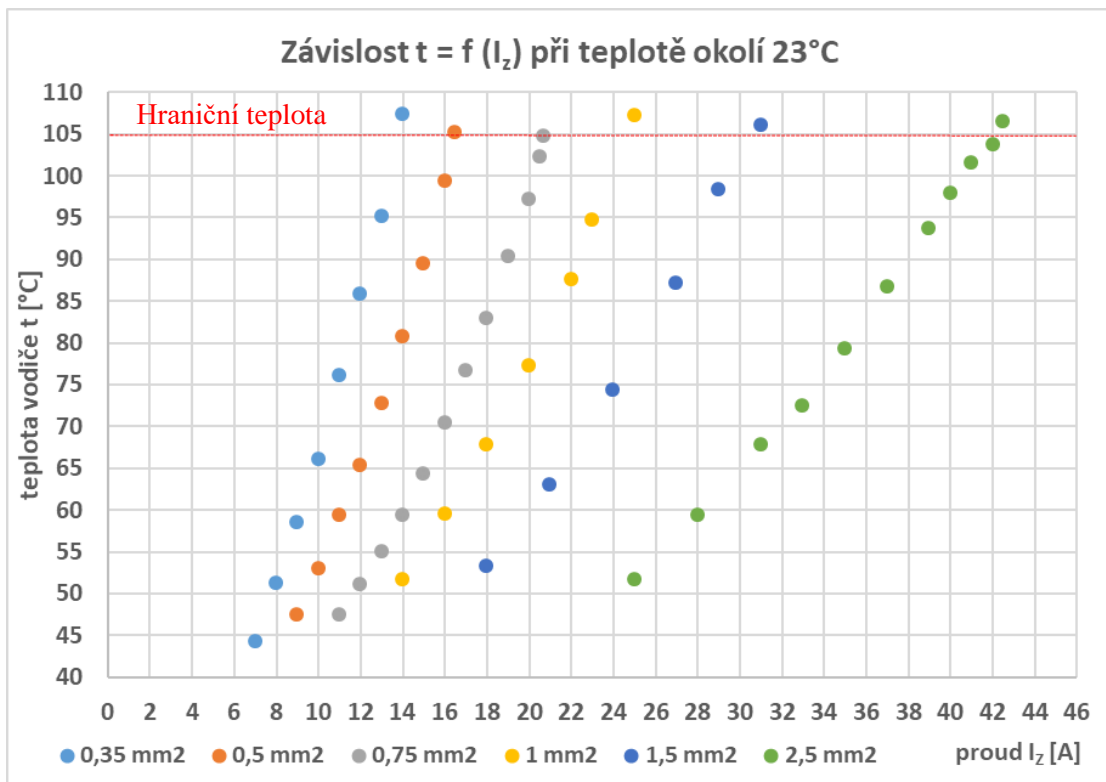
Na následujícím obrázku je fotografie měřícího pracoviště uvnitř klima komory. Žluté přírodní vodiče jsou K-články. Jeden měří teplotu okolí (teplotu uvnitř komory) a druhý měří teplotu pod izolací vodiče. Černé svorky slouží k měření úbytku napětí na vodiči, který je umístěn pod poklopem. Celá měřící aparatura je umístěna na nevodivé plastové podložce.



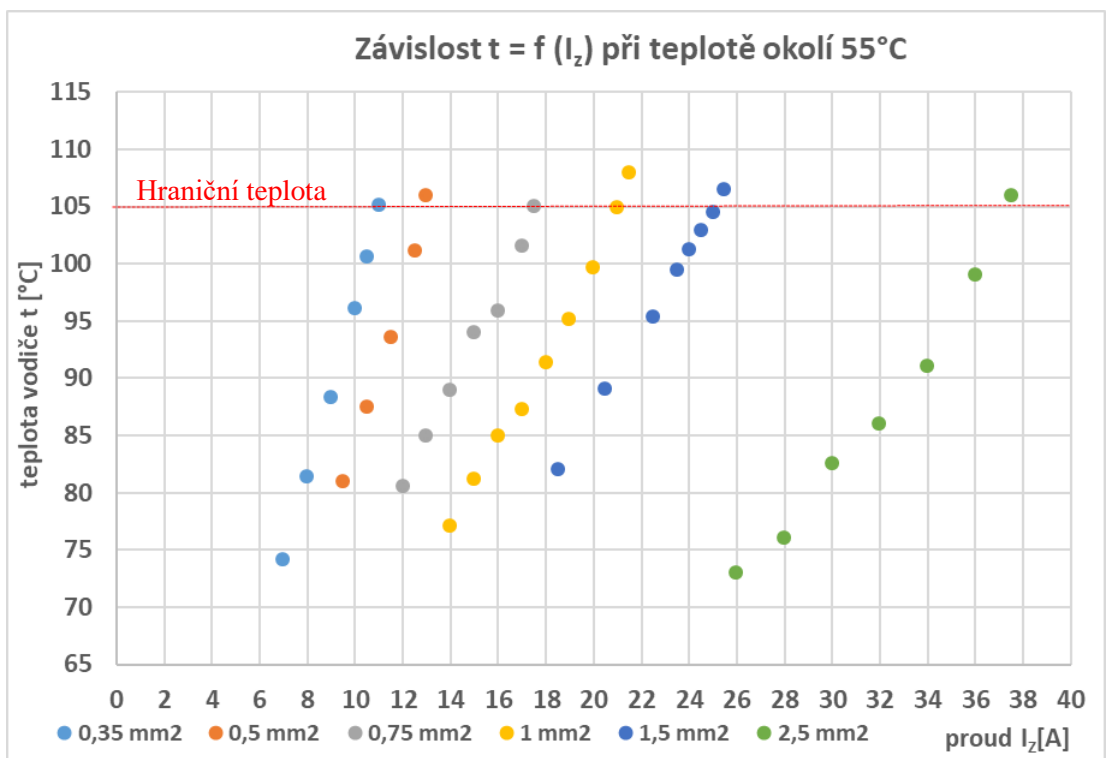
Obrázek 9: Měřicí pracoviště [vlastní materiál]

## 7.5. Grafické znázornění naměřených dat

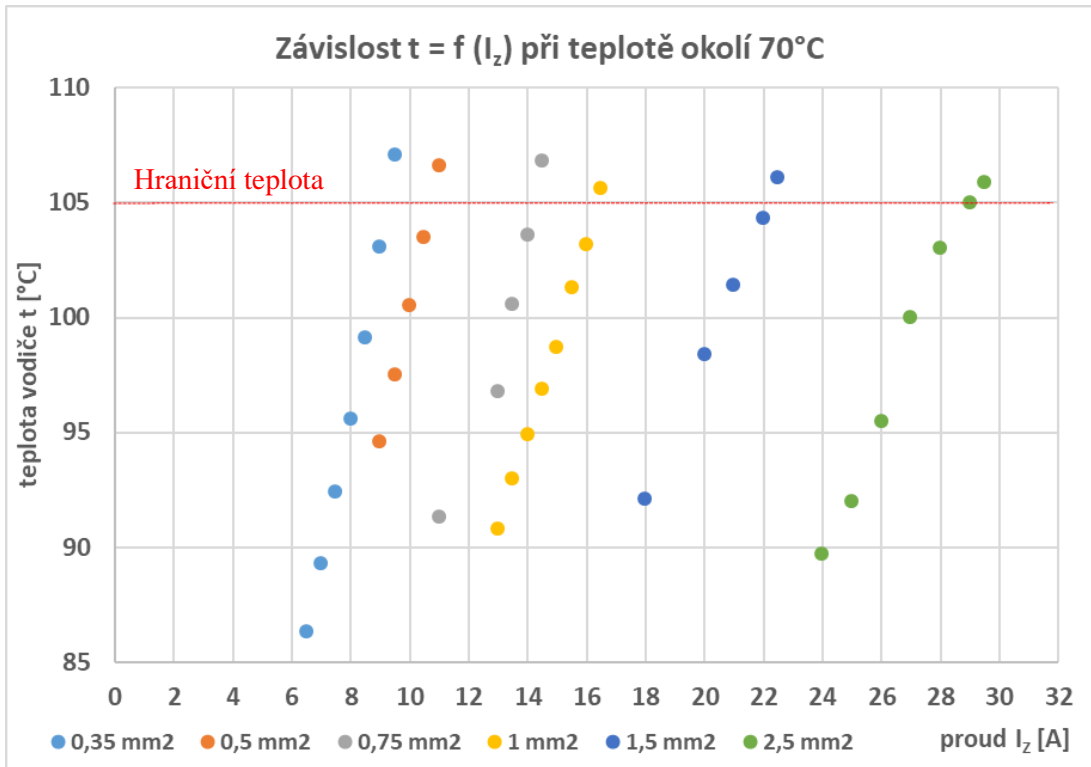
Graf 2: Závislost  $T = f(I_z)$  při teplotě okolí 23 °C



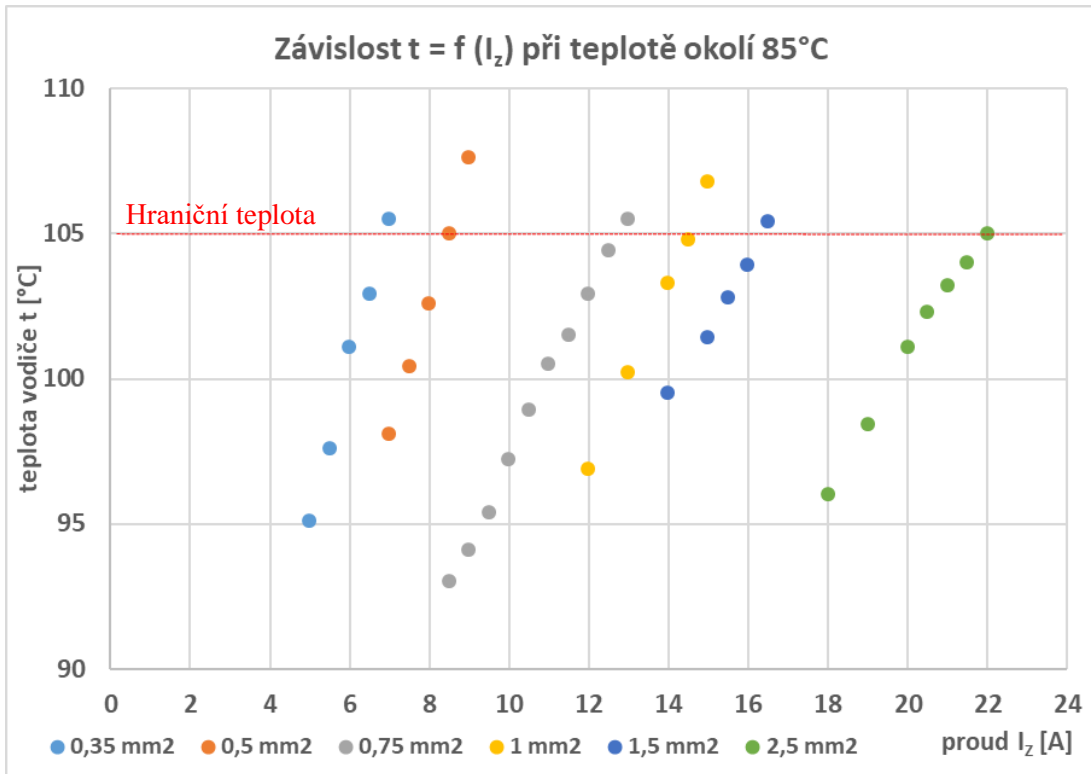
Graf 3: Závislost  $T = f(I_z)$  při teplotě okolí 55 °C



Graf 4: Závislost  $T = f(I_z)$  při teplotě okolí 70 °C



Graf 5: Závislost  $T = f(I_z)$  při teplotě okolí 85 °C



## 7.6. Porovnání naměřených hodnot

Pro každý průřez vždy porovnávám tři hodnoty maximálního trvalého dovoleného proudu. Hodnoty těchto proudů jsem získal z příslušné normy, z vlastního měření a také od nezávislého výrobce vodičů, jehož vodiče také splňují normu ISO 6722. Hodnoty maximálních zátěžných proudů poskytnuté nezávislým výrobcem považuji za nejpřesnější a je možné vzhledem k nim určit, zdali hodnoty v normě odpovídají fyzikálnímu chování ohřivaného vodiče daného průřezu a při dané teplotě okolí. Naměřená data získaná měřením na vodičích od výrobce a dodavatele Kablo Vrchlábí s.r.o. porovnávám s daty z normy. Z tohoto srovnání by mělo být zřejmé, zdali používané průřezy vodičů splňují normu a nakolik jsou či nejsou předimenzované. Srovnání provádím v teplotách okolí ( $23 \pm 0,5$ ) °C, dále 55 °C, 70 °C a 85 °C, i když z praktického hlediska jsou nejpodstatnější teploty 55 °C a vyšší. Hodnoty proudů uvádím pro větší přehlednost v tabulce, z níž jsem sestavil grafické závislosti maximálního dovoleného zátěžného proudu  $I_{z, MAX}$  na teplotě okolí  $T$  vzhledem k použité třídě izolace, v tomto případě třída B do 105°C.

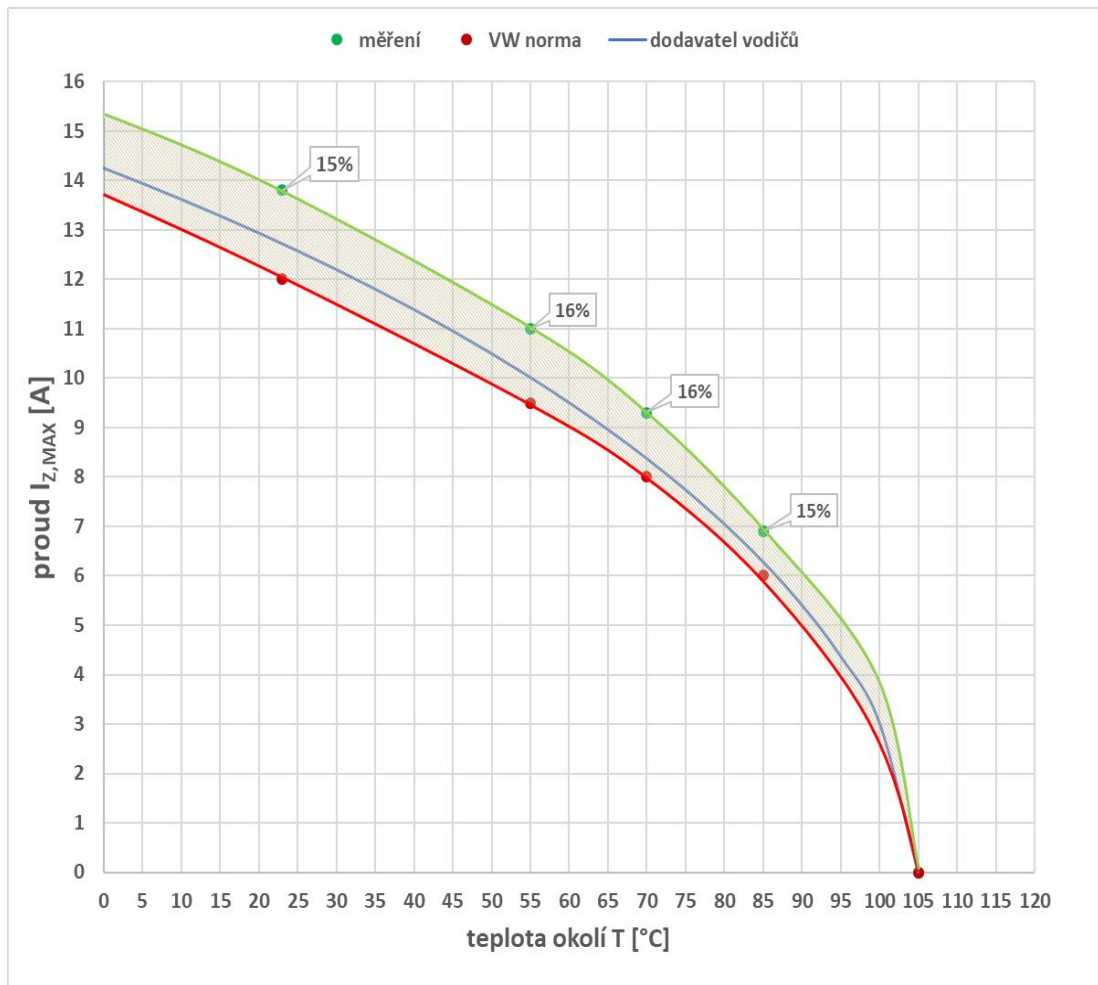
Tabulka 5: Maximální zatížení vodičů pro různé teploty okolí

Maximální zatížení vodičů [A]												
průměr vodiče [mm <sup>2</sup> ]	T = 23 °C			T = 55 °C			T = 70 °C			T = 85 °C		
	měření	norma	dodavatel	měření	norma	dodavatel	měření	norma	dodavatel	měření	norma	dodavatel
0,35	13,8	12,0	12,7	11,0	9,5	10,0	9,3	8,0	8,4	6,9	6,0	6,3
0,5	16,4	15,5	16,0	12,9	12,5	12,6	10,8	10,5	10,5	8,5	8,0	7,9
0,75	21,0	20,0	20,7	17,5	16,0	16,3	14,3	13,5	13,7	12,7	10,0	10,2
1	24,7	24,5	24,0	21,0	19,5	19,5	16,4	16,5	16,3	14,6	12,5	12,2
1,5	30,8	32,0	31,4	25,2	25,0	24,6	22,5	21,0	20,6	16,4	16,0	15,4
2,5	42,2	44,0	42,9	36,8	35,0	33,8	29,0	29,0	28,2	22,0	22,0	21,2

Každý z grafů je sestaven pro konkrétní průřez vodiče. Závislosti maximálního dovoleného zátěžného proudu  $I_{z, MAX}$  jsou vyneseny na osu y v různých barvách dle zdroje naměřených dat. Tyto závislosti vždy vymezují pracovní oblasti, ve kterých se lze s daným průřezem vodiče vzhledem k teplotě okolí pohybovat. Červenou barvou je vyznačena křivka vymezující pracovní oblast danou interní normou, modrou barvou je vynesena křivka vymezující pracovní oblast podle dat od nezávislého výrobce (pozn. v grafu označeno jako dodavatel) vodičů a zelenou barvou je vynesena křivka sestavená z mnou naměřených dat. Křivky vznikly vhodným proložením naměřených či odečtených hodnot. Vyšrafovaná plocha značí toleranční pásmo, které rozšiřuje pracovní oblast vzhledem k normě a jehož horní hranice říká, o kolik lze daný změřený vodič více zatížit maximálním trvalým proudem  $I_{z, MAX}$  oproti hodnotám uváděným v normě. Ve vyznačených bodech jsem vypočetl, o kolik procent byla hodnota tohoto proudu větší nebo menší oproti hodnotě uváděné normou. Pokud u procentní hodnoty není znaménko, je tím myšleno „+“, v případě záporných procent, je zde znaménko „-“ uvedeno.

## 7.6.1. Průřez vodiče 0,35 mm<sup>2</sup>

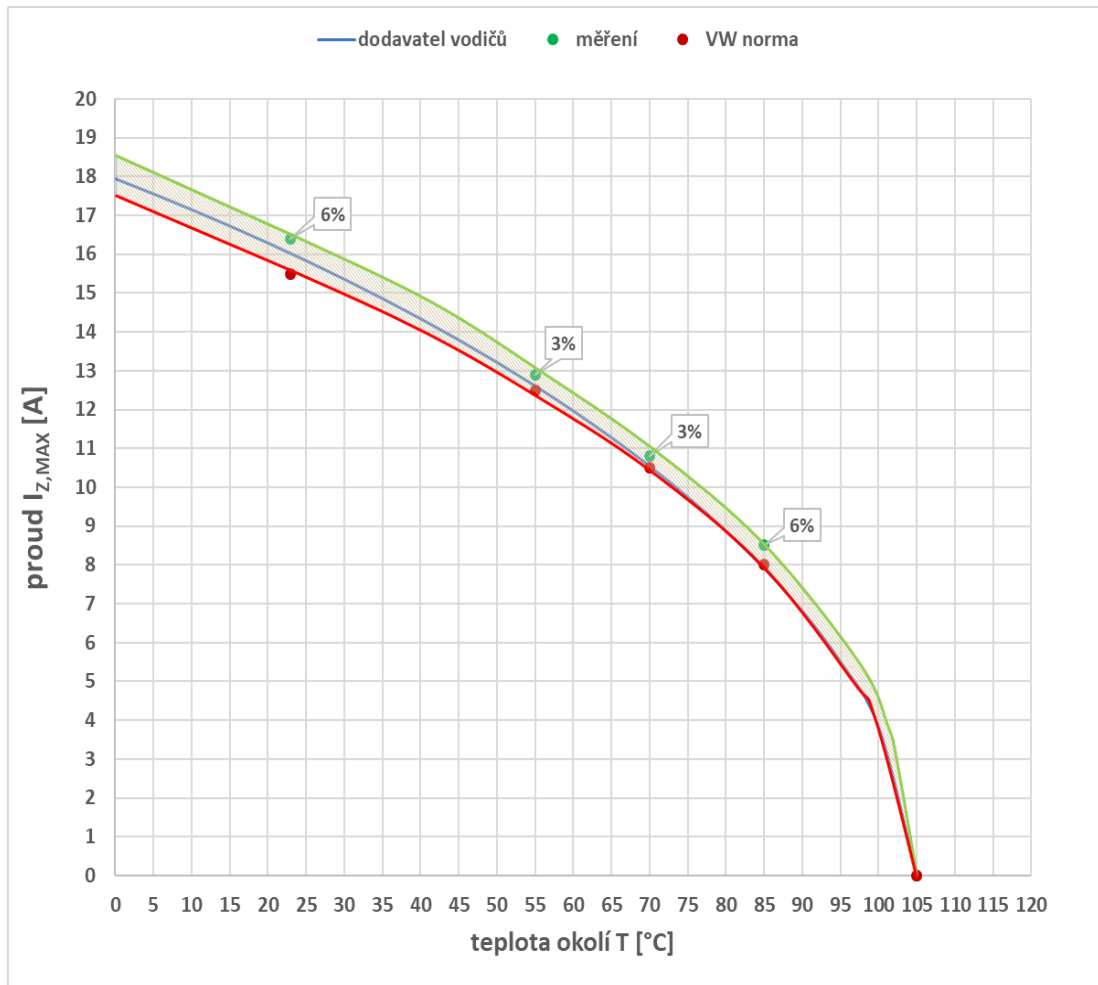
Graf 6: Průřez vodiče 0,35 mm<sup>2</sup>



Z grafu můžeme vyčíst několik věcí. První z nich je, že hranice pracovní oblasti změřeného vodiče s průřezem 0,35 mm<sup>2</sup> je o přibližně 16 % posunuta v celém rozsahu teplot okolí k vyšším hodnotám zátěžného proudu  $I_{z, MAX}$  (oproti hranici pracovní oblasti dané normou). Pro tento změřený průřez vodiče je tedy požadavek vyplývající z normy splněn, a to s rezervou 16 %. Můžeme tedy tvrdit, že vodič je dimenzován s určitou rezervou, či je lehce předdimenzován. Druhá věc, která z grafu vyplývá, je skutečnost, že hodnoty maximálních dovolených zátěžných proudů pro konkrétní průřezy s ohledem na teplotu okolí uváděné v normě téměř odpovídají fyzikálnímu chování daného průřezu vodiče. V tomto případě je reálně uvažovat o možnosti náhrady silnějšího průřezu tímto průřezem anebo pro dané proudové zatížení využití slabšího meziprůřezu, který může být pro jiné automobilky dodáván vodič průřezu 0,3 mm<sup>2</sup>. Proto bych navrhol znovu opakovat měření na tomto vodiči, ale jiném vzorku, a také zkusit změřit vodič průřezu 0,3 mm<sup>2</sup> od jiného výrobce, který by mohl být potenciálním náhradníkem.

## 7.6.2. Průřez vodiče 0,5 mm<sup>2</sup>

Graf 7: Průřez vodiče 0,5 mm<sup>2</sup>

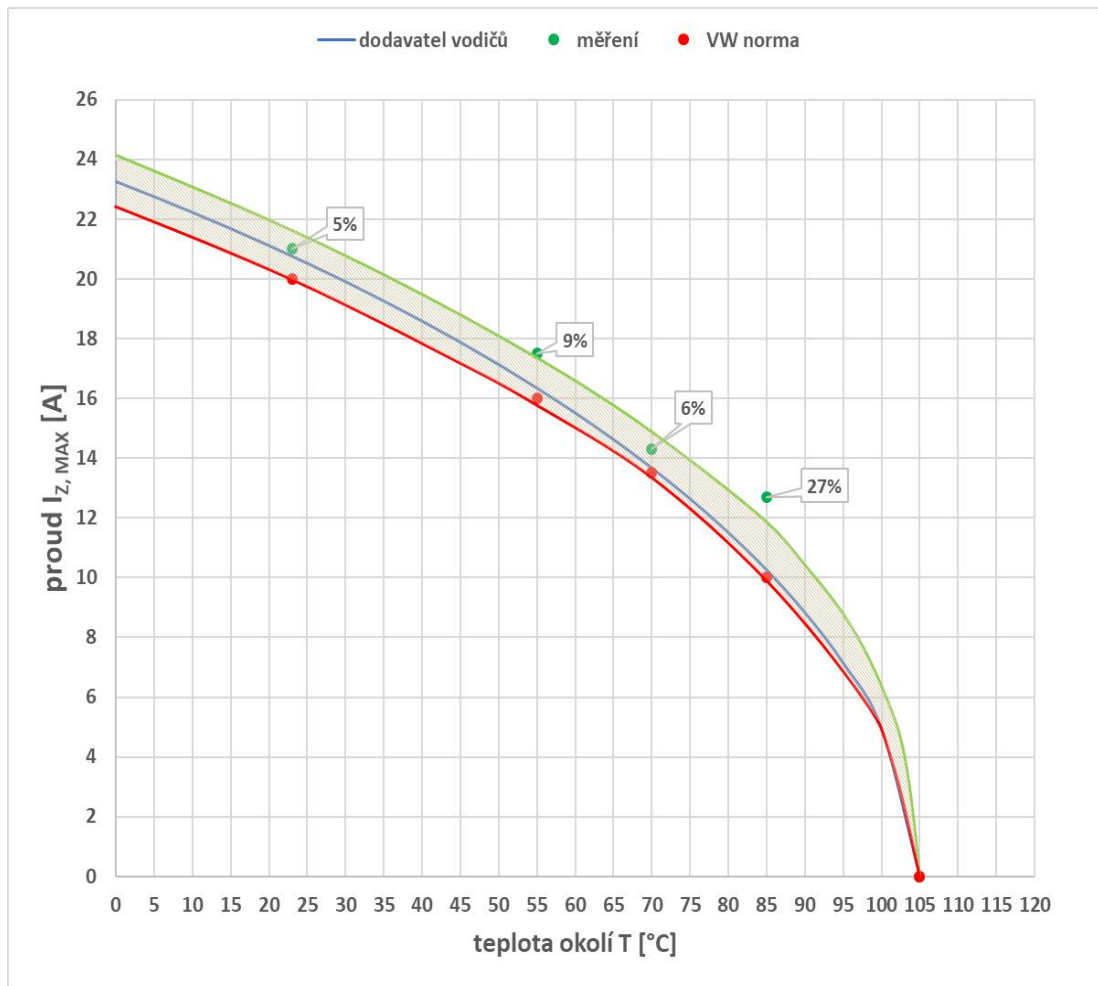


I u tohoto průřezu jsem z mnoha naměřených dat sestavil hranici pracovní oblasti, která leží nad hranicí pracovní oblasti hodnot z normy, a to přibližně o 5 %. Vzhledem k tomu, že diference mezi naměřenými hodnotami a hodnotami z normy není v takovém rozsahu jako u výše uvedeného, tak u tohoto průřezu vodiče nevidím potenciál v možnosti náhrady o třídu většího průřezu tímto průřezem. Opět je zde patrné, že změřený vodič daného průřezu splňuje požadavky normy, a je tedy vyhovující. I v tomto případě hodnoty uvedené v normě téměř odpovídají fyzikálnímu chování vodiče oteplovaného procházejícím proudem. Od teploty okolí  $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  se data normy s daty od výrobce vodičů shodují, a křivky v grafu proto splývají.



### 7.6.3. Průřez vodiče 0,75 mm<sup>2</sup>

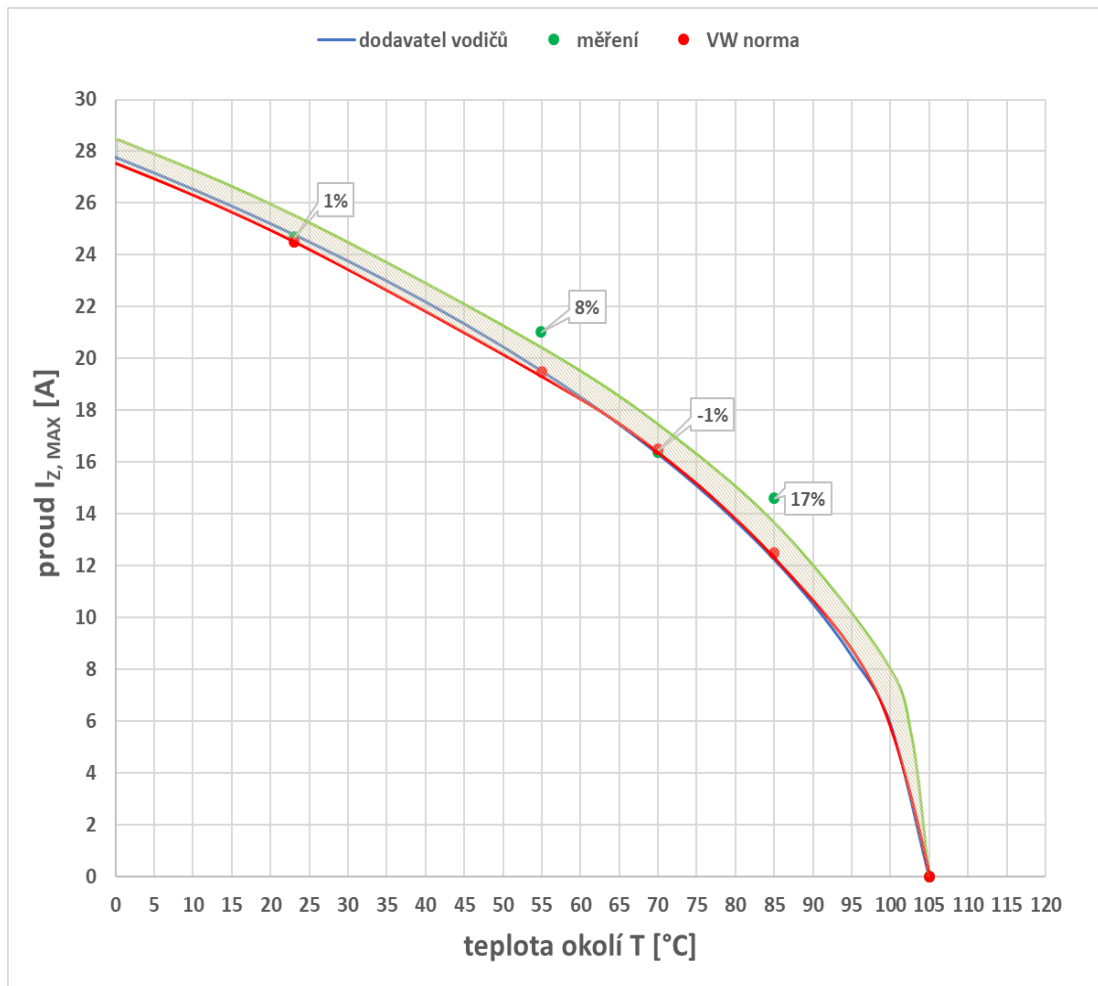
Graf 8: Průřez vodiče 0,75 mm<sup>2</sup>



Stejně jako u předchozích průřezů, i zde jsem z naměřených dat sestavil hranici pracovní oblasti, která leží nad hranicí pracovní oblasti hodnot z normy, a to přibližně o 8 %. Hodnota maximálního zátěžného proudu při teplotě okolí  $T = 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$  vyšla o 27 % vyšší, než je udávána normou. Tuto hodnotu však nepovažuji vzhledem k ostatním změřeným hodnotám za zcela správnou a směřodatnou. Ani u tohoto průřezu vodiče nevidím potenciál v možnosti nahradit větší průřezy. Opět je zde patrné, že změřený vodič daného průřezu splňuje požadavky normy a je tedy vyhovující. I tomto případě hodnoty z normy téměř odpovídají fyzikálnímu chování vodiče oteplovaného procházejícím proudem.

## 7.6.4. Průřez vodiče 1 mm<sup>2</sup>

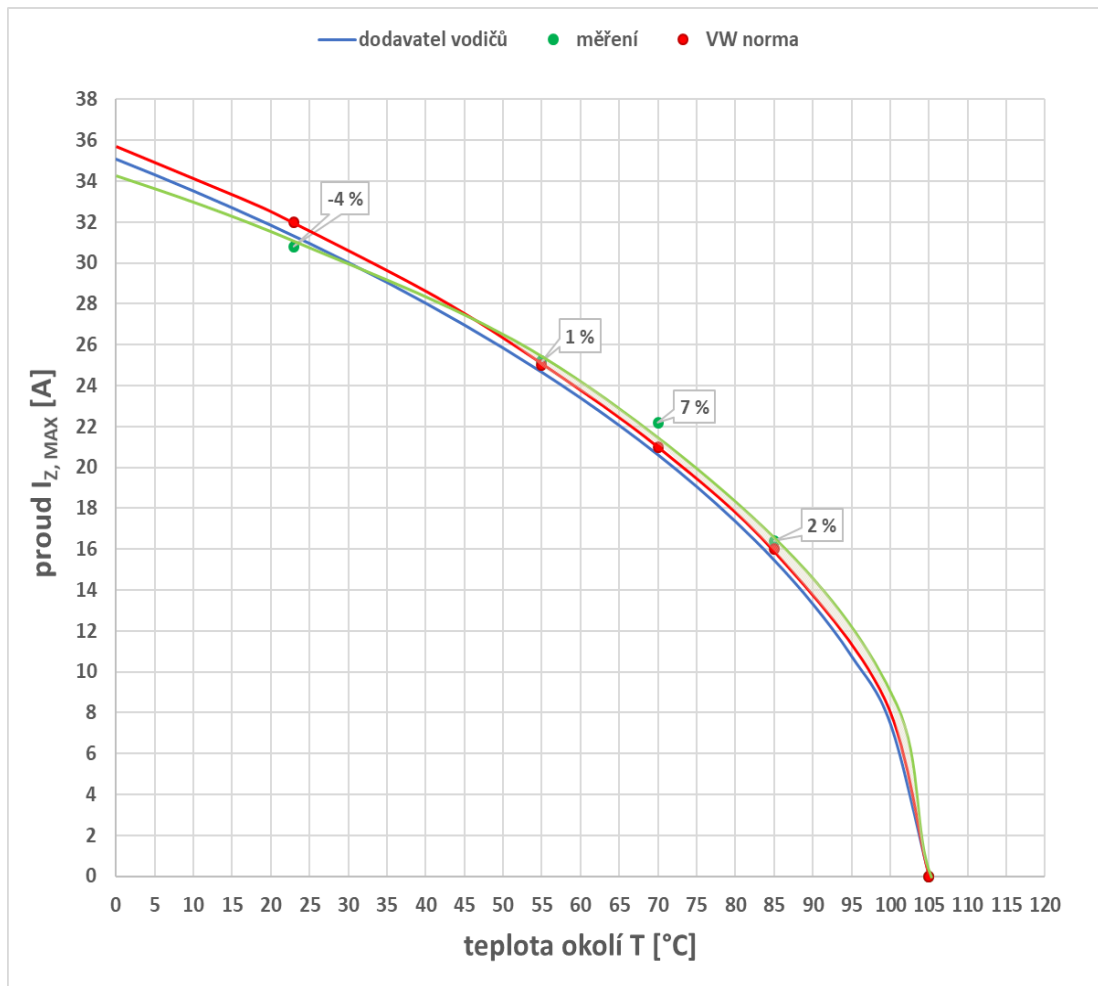
Graf 9: Průřez vodiče 1 mm<sup>2</sup>



Hranice pracovní oblasti změřeného vodiče s průřezem 1 mm<sup>2</sup> je o přibližně 5 % posunuta k vyšším hodnotám zátěžného proudu  $I_{z, MAX}$ . Je to pouze hodnota průměrná, protože naměřené hodnoty se u tohoto vodiče značně rozcházejí. Zatímco u teploty okolí 23 °C a 70 °C je odchylka naměřených hodnot a hodnot udávaných normou zanedbatelná, tak pro teplotu okolí 85 °C je tato odchylka 17 %, a proto ji také nelze považovat jako zcela směrodatnou. Vzhledem k tomu, že chyba měření se pohybuje okolo 1 %, bylo by vhodné provést měření na daném průřezu (na jiném vzorku vodiče) znovu. Dle měření vodič nevyhovuje v celé pracovní oblasti normě, což může být zapříčiněno již zmíněnou chybou měření. Vzhledem k tomu, že rezerva není příliš velká, nedoporučuji tento průřez k nahrazení většího průřezu. Maximální zátěžné proudy z normy a výrobce vodičů u tohoto průřezu korespondují a lze tedy říci, že hodnoty v normě odpovídají fyzikálnímu chování vodiče.

## 7.6.5. Průřez vodiče 1,5 mm<sup>2</sup>

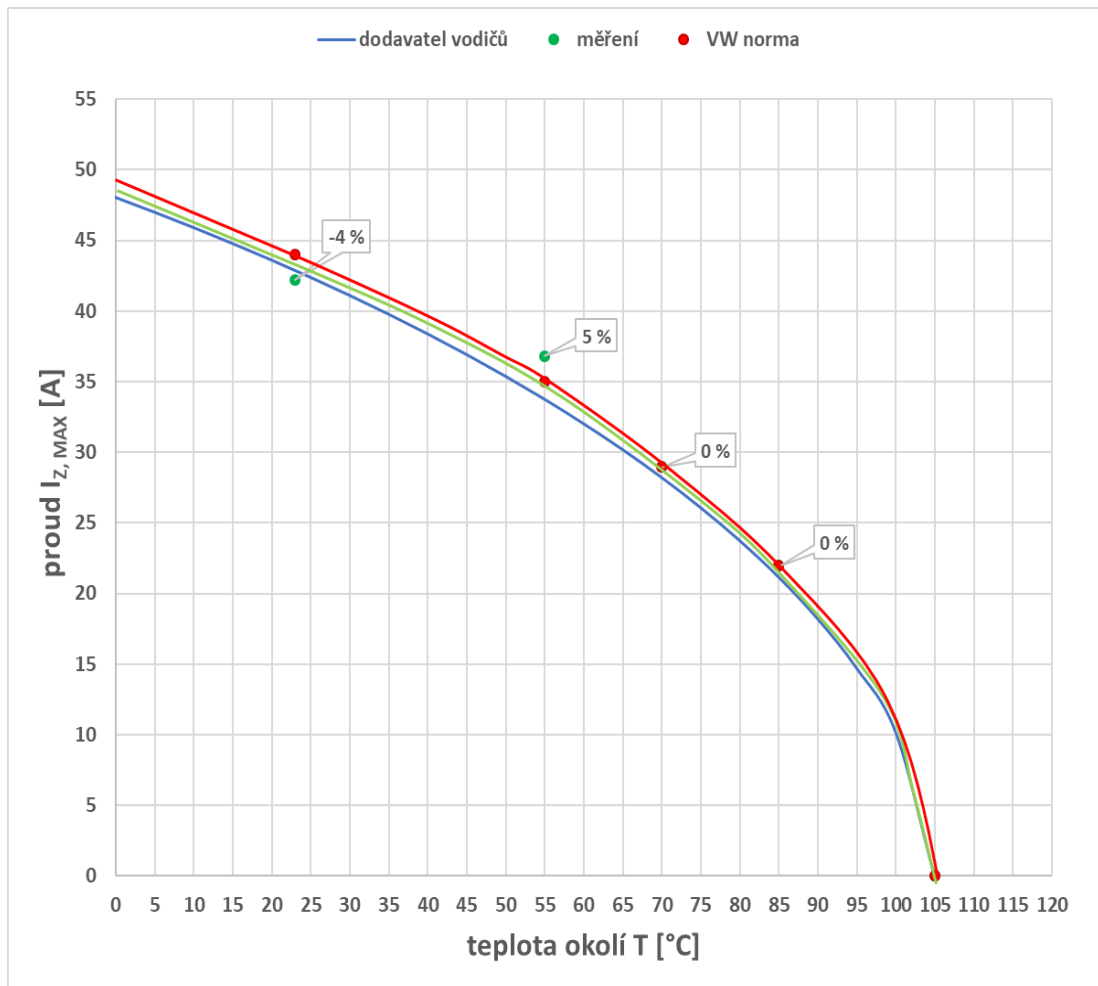
Graf 10: Průřez vodiče 1,5 mm<sup>2</sup>



V tomto případě se naměřené hodnoty velmi dobře shodují s hodnotami z normy i s hodnotami od výrobce vodičů. U tohoto průřezu vodiče není možné zcela jasně říci, jestli vyhovuje technickým předpisům, protože se křivka vymežující pracovní oblast změřeného vodiče a křivka sestavená z hodnot z normy protínají. Je to způsobeno tím, že naměřená hodnota maximálního trvalého zátěžného proudu v pokojové teplotě je o 4 % nižší než hodnota udávaná v normě. Takto velká diference už není vzhledem k malé relativní chybě měření způsobená nepřesností měřícího zařízení, a proto by bylo potřeba měření opakovat, aby se tato diference potvrdila. Kvůli velmi malé rezervě ani tento průřez nelze doporučit jako možnou náhradu za silnější. Hodnoty maximálních dovolených zátěžných proudů pro konkrétní průřezy s ohledem na teplotu okolí uváděné v normě téměř odpovídají fyzikálnímu chování daného průřezu vodiče.

## 7.6.6. Průřez vodiče 2,5 mm<sup>2</sup>

Graf 11: Průřez vodiče 2,5 mm<sup>2</sup>



U průřezu vodiče 2,5 mm<sup>2</sup>, tedy nejsilnějšího vodiče, který jsem si pro své měření vybral, je naměřená pracovní oblast téměř v souladu s pracovní oblastí udávanou normou. Jsou tu pouze drobné rozdíly u naměřených hodnot při teplotě okolí 23 °C a teplotě 55 °C, které by bylo potřeba ověřit opětovným měřením, protože nemohly být způsobeny chybou měření. Ani u tohoto průřezu vodiče není potenciál k náhradě, a to ani za meziprůřez, protože pracovní oblasti jsou téměř totožné. To samé platí i pro porovnání dat od výrobce vodičů s daty z normy. Hodnoty maximálních dovolených zátěžných proudů pro konkrétní průřezy s ohledem na teplotu okolí uváděné v normě odpovídají fyzikálnímu chování vodiče, a nejsou tedy pro tento konkrétní průřez nijak přísně nastaveny.

## 8. Technický návrh redukce průřezů vodičů

V této části práce se zaměřuji na to, co všechno bereme při dimenzování vodičů v automobilu v úvahu a jakým způsobem by se v automobilu daly nahradit vodiče silnějších průřezů vodiči s průřezem menším či meziprůřezy, jaké premisy proto musí být splněny a co všechno je třeba zohlednit a provést, než by takový technický návrh mohl být ve voze nasazen. Jelikož je realizace takového návrhu velmi technicky a především časově náročná, zabývám se pouze jeho obecným popisem, jenž by se dal aplikovat při redukci průřezu vodičů v konkrétní oblasti vozu.

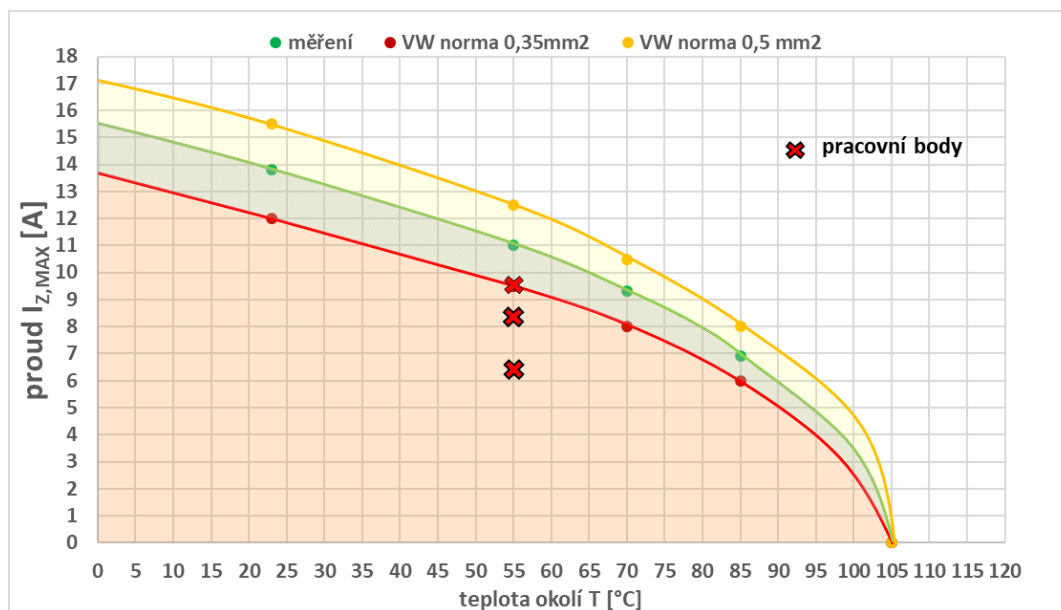
Při dimenzování vodičů je třeba mít vždy na paměti bezpečnost uživatele daného zařízení. V případě automobilu toto platí dvojnásob, protože jakákoliv chyba, ať už v dimenzování či v jiné oblasti, by mohla vést k technické poruše a následné újmě na zdraví uživatele vozidla. Proto je potřeba volit velmi pečlivý a zodpovědný přístup.

### 8.1. Premisy technického návrhu

Aby bylo relevantní vůbec přemýšlet o redukci průřezů vodičů, musí být splněny všechny základní předpoklady.

#### 8.1.1. Dovolená proudová zatížitelnost

Jedním z prvních předpokladů je, že slabší průřez vodiče namísto silnějšího je schopen vydržet stejné dlouhodobé proudové zatížení. To znamená, že pracovní body spotřebiče napájeného silnějším průřezem vodiče se nacházejí uvnitř nebo na hraně pracovní oblasti vodiče s průřezem slabším. Doposud jsem uvažoval pouze maximální hodnoty zátěžných proudů, ale v každém vodiči tečou dle jeho použití časově proměnné proudy různé velikosti. Dalším předpokladem je existence tolerančního pásma pro slabší průřez (oproti normě), která značí to, že daný průřez vodiče může být zatížen větším trvalým proudem než jaký vyžaduje norma. Je tedy předdimenzovaný. V takovém případě bychom se nemuseli obávat pohybovat na hranici normy, protože bychom věděli, že je zde určitá bezpečnostní rezerva a vodiči nehrozí žádné trvalé poškození. Z měření vyplynulo, že z hlediska proudové zatížitelnosti, je zde potenciál k redukci a tento předpoklad by mohl být splněn u průřezu vodiče  $0,35 \text{ mm}^2$ . Daná toleranční oblast zde byla ze všech mnou měřených průřezů procentuálně největší. Na následujícím obrázku č. 10 je modelový příklad situace, kdy se pracovní body spotřebiče napájeného vodičem s průřezem  $0,5 \text{ mm}^2$  nachází v pracovní oblasti průřezu  $0,35 \text{ mm}^2$ . Červenou barvou je vyznačená pracovní oblast podle normy u průřezu vodiče  $0,35 \text{ mm}^2$ , žlutou barvou pracovní oblast průřezu vodiče  $0,5 \text{ mm}^2$  a šedivě vyšrafovaná oblast je toleranční pásmo vodiče průřezu  $0,35 \text{ mm}^2$ .



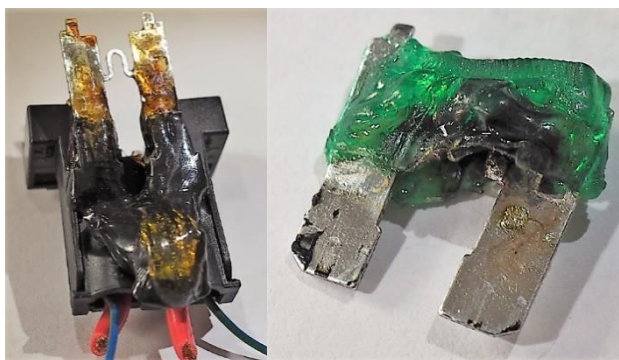
Obrázek 10: Pracovní oblasti vodičů průřezů 0,35 mm<sup>2</sup> a 0,5 mm<sup>2</sup> [vlastní tvorba]

### 8.1.2. Dovolené úbytky napětí

Další předpoklad, který musí být splněn, je dovolený úbytek napětí na redukovaném průřezu vodiče. Jak je známo, se slabším průřezem roste elektrický odpor, na němž by mohl pracovní proud vyvolat nedovolený úbytek napětí a ohrozit tak funkčnost některého ze zařízení. Součástí provedeného měření bylo i naměření úbytků napětí na všech vodičích při všech okolních teplotách. Prvotním záměrem bylo tato data vyhodnotit a zohlednit, ale vzhledem k rozsahu práce a časové náročnosti jsou pouze přiložena jako příloha s potenciálem využitelnosti při další analýze.

### 8.1.3. Odolnost vůči zkratům a funkčnost jištění

Nejen po napěťové stránce musí vodič vyhovovat. Důležitá je samozřejmě i jeho odolnost vůči zkratovým proudům, kterou musíme vzít při dimenzování také v potaz. Je potřeba říci, že každá proudová cesta by měla být jištěna vůči těmto zkratovým proudům, čímž by mělo před poškozením daného vodiče dojít k přetavení pojistky. Použitím slabšího průřezu vodiče tedy nesmíme ohrozit funkčnost jištění a vodič musí být schopen dodat dostatečné množství energie k přetavení pojistky, než dojde k jeho destrukci. Jak ukazuje praxe, problém může nastat při použití nelicencovaných pojistek, které se nemusí při definovaném proudu přetavit. Proto je i na toto potřeba dávat pozor.



Obrázek 11: Nelicencované pojistky 20 a 30 A při 160 % jmenovitého proudu [interní materiál ŠA]

#### 8.1.4. Mechanická pevnost vodiče

Jedním z dalších předpokladů je mechanická pevnost v tahu a odolnost proti ohybu, kterou musí vodič disponovat, aby mohl být v dané oblasti vozu nasazen. Opět i zde hraje v neprospěch slabšího průřezu. Zatímco například u měděného vodiče průřezu  $0,5 \text{ mm}^2$  je pevnost v tahu 110 N, tak u průřezu  $0,35 \text{ mm}^2$  je pouze 77 N.

#### 8.1.5. Přesnost měření a nepřesnosti při výrobě vodičů

Dalším předpokladem pro možnou náhradu silnějších průřezů za slabší či použití meziprůřezů namísto standardních průřezů je dostatečně velká naměřená rezerva pro daný průřez vodiče. Musíme si být jisti tím, že tato rezerva není zapříčiněna nepřesností měření nebo nepřesností při výrobě samotného vodiče, ale že bychom tuto rezervu (toleranci) naměřili na tomto konkrétním průřezu vždy. Z tohoto důvodu by bylo potřeba ověřit tento předpoklad na více vzorcích vodiče a na více výrobních várkách. Předpokládejme, že výrobce a dodavatel vodičů se nemění a vodiče tak mají stále stejné parametry.

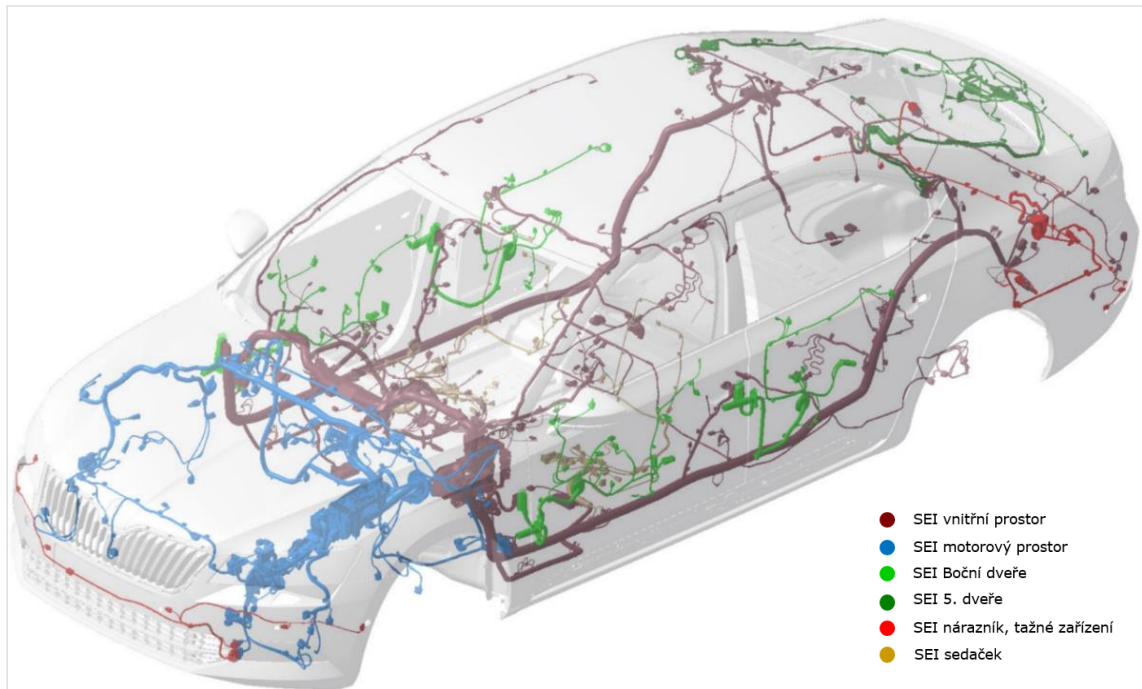
#### 8.1.6. Uložení vodičů ve svazku

V neposlední řadě bychom neměli opomenout ani fakt, že většina vodičů se v prostoru nevyskytuje sama, ale jsou společně uloženy ve svazku. Praxe ukazuje, že to hraje roli v rozdílném chování oteplování samotného vodiče.

### 8.2. Postup při realizaci technického návrhu

V první řadě bychom se měli podle výkresu vozu zaměřit na oblast, ve které je potenciál k redukci průřezů vodičů. Tyto oblasti se liší svoji definovanou provozní teplotou, která se zde

vyskytuje. Tato teplota samozřejmě nezávisí jen na rozdílném oteplení různých částí vozu, ale i na okolních podmínkách. Například v motorovém prostoru se teploty pohybují okolo 85+ °C, v interiéru a ve dveřovém prostoru jsou teploty nižší, běžně do 55 °C. Rozdělení elektroinstalace vozu do jednotlivých oblastí je vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 12: Uložení elektrické instalace ve voze [inertní materiál ŠA]

Následně bychom si vybrali průřezy vodičů s potenciálem k redukci. Podle provedeného měření je z hlediska proudové zatížitelnosti vodiče potenciál u průřezu 0,35 mm<sup>2</sup>, který má největší toleranční pásmo. Konkrétně jde o náhradu o třídu vyššího nabízeného průřezu, tedy 0,5 mm<sup>2</sup> průřezem 0,35 mm<sup>2</sup>.

V dalším kroku musíme změřit proudy procházející vybraným vodičem ve všech režimech funkce zařízení, které je tímto vodičem napájeno, anebo můžeme využít již existujících zátěžových diagramů pro daný spotřebič. Jestliže se všechny změřené pracovními body nacházejí v tolerančním pásmu vodiče slabšího průřezu, v tomto případě 0,35 mm<sup>2</sup>, a jsou splněny všechny výše popsané předpoklady, je možné vyzkoušet nasazení průřezu 0,35mm<sup>2</sup> namísto průřezu 0,5mm<sup>2</sup>.

Na závěr musíme vyzkoušet funkčnost napájeného zařízení, a to opět ve všech režimech jeho funkce. Pokud je funkčnost zařízení v pořádku, průřez vodiče by mohl být redukován, pokud ne, je potřeba zachovat průřez původní.



## 9. Ekonomické zhodnocení technického návrhu

Podstatou celého technického návrhu a hlavní motivací k realizaci je úspora financí. Kdyby tento návrh s sebou nenesl žádnou potenciální úsporu, nebyl by důvod ho realizovat. Jak vyplynulo z mnou provedeného měření, je zde potenciál k nahrazení silnějšího průřezu vodičů průřezem slabším. Protože jsem největší potenciál naměřil u vodiče s průřezem 0,35 mm<sup>2</sup>, bylo by vhodné zjistit, zda by náhrada vodiče silnějšího průřezu 0,5 mm<sup>2</sup> za 0,35 mm<sup>2</sup> byla ekonomicky výhodná. Konkrétněji, kolik metrů vodiče by se muselo nahradit, aby vyšla investice efektivní. Na celou ekonomickou záležitost nahlížím z pohledu automobilky.

Může se na první pohled zdát, že takového snížení průřezu se nemůže vzhledem k investičním nákladům vyplatit. Ano, investiční náklady sice nejsou zanedbatelné, ale musíme vzít v potaz fakt, že automobilka ročně vyprodukuje přes jeden milion vozů a její produkce každým rokem roste. Jen díky tak velkému produkovanému objemu je vůbec možné o úspoře uvažovat. Dalším významným prvkem je skutečnost, že produkce výroby určitého typu vozu je 8 let, a proto se počáteční investice mezi jednotlivé roky rozpustí. Všechny cenové údaje jsou uváděny v eurech, protože s touto měnou pracuje jak ŠKODA AUTO a.s., tak její dodavatelé i výrobci vodičů.

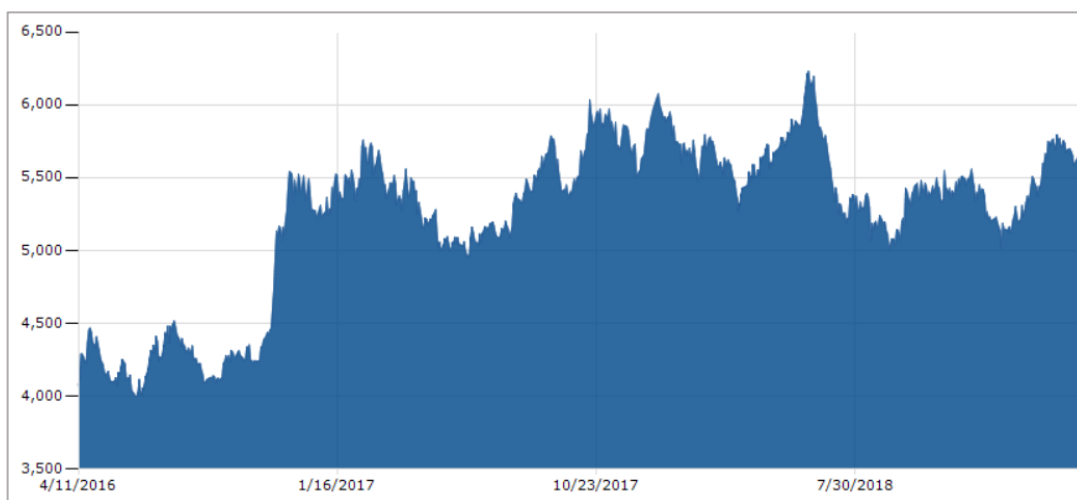
### 9.1. Investiční náklady

Proto, aby bylo možné zhodnotit efektivitu dané investice, je potřeba znát co nejlépe hodnoty všech vstupů. Mezi nimi jsou investiční náklady, se kterými se ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. při hodnocení investice počítá. Mezi ně patří práce kvalifikovaného pracovníka, která je ve firmě oceněna 40 €/h. Celkovou dobu potřebnou k vypracování technického návrhu odhaduji na 320 h. Dalším investičním nákladem je v případě nahrazování vodičů ve voze vydání technických změn a úprava kusovníků. Tuto investici, jsem po konzultaci s vedoucím stáže ve ŠA odhadl na 15 000 €. Poslední položkou, která je pro zhodnocení investiční záměru důležitá jsou náklady dodavatele, po konzultaci byly odhadnuty na 5000 €. Celkově tak investiční náklady činí **32 800 €**.

### 9.2. Cena mědi a vodičů

Dalším ze vstupů, který má vliv na hodnocení investice je cena mědi, protože měď je nejdůležitějším vstupním materiálem pro výrobu vodivých jader vodičů. Její cena se na trhu neustále mění. Jak je vidět na obrázku č. 13, její cena se v posledních dvou letech pohybuje okolo 5,5 €/kg a očekávám, že se kolem této ceny bude pohybovat i v příštích letech. Na základě tohoto předpokladu lze tvrdit, že nákupní cena vodičů, která je především ovlivněna právě cenou mědi, se v příštích letech výrazně měnit nebude. Nyní (v 1. čtvrtletí roku 2019) se nákupní cena vodičů

průřezu 0,35 mm<sup>2</sup> pohybuje okolo **0,0092 €/m** a 0,5 mm<sup>2</sup> okolo **0,0122 €/m** a očekávám, že rozdíl mezi těmito cenami bude i v následujících několika letech shodný.



Obrázek 13: Vývoj ceny mědi mezi roky 2016 - 2019 [30]

### 9.3. Emise CO<sub>2</sub>

Snížení emisí je v této době velmi žhavé téma, a to zejména kvůli nařízení Evropské unie. Emisní limity, které budou platné od roku 2020 a účinné od roku 2021, mohou znamenat pro automobilky značné náklady. Proto jakákoliv úspora CO<sub>2</sub> hraje velkou roli. Podle nové evropské normy musí být spotřeba vozů pod hranicí 95 g CO<sub>2</sub>/km danou průměrem všech modelů v nabídce automobilky. Za každý další gram na kilometr navíc je udělena pokuta ve výši 95 €, a to za každé registrované vozidlo. To pro představu odpovídá spotřebě 3,5 litrů nafty či 4,1 litrů benzínu na 100 km. Úspora hmotnosti automobilu, která by byla způsobena nahrazením silnějších průřezů slabšími, může být vyjádřena pomocí emisního ekvivalentu. Jeden kilogram ušetřené hmotnosti na automobilu odpovídá úspoře 0,08 g/km CO<sub>2</sub>, což je v přepočtu **7,6 €**. Při pozdějším výpočtech jsou uvažovány dva scénáře. Jeden, ve kterém se automobilka nachází nad hranicí 95 g/km. A druhý, ve kterém je pod touto hranicí a nemá tedy s emisními ekvivalenty smysl počítat. Úspora je potom čistě materiálová. [31, 32]

### 9.4. Diskontní sazba

Určení správné diskontní sazby hraje v hodnocení investice velmi významnou roli a může ovlivnit naše rozhodnutí. Diskontní sazba vyjadřuje cenu ušlé příležitosti. Nejčastěji může být ztotožňována s úrokovou mírou státních dluhopisů nebo terminovaných vkladů u komerčních bank. Ta se současně pohybuje mezi 2 až 3 % p.a. U hodnocení naší investice by však měla být tato sazba stanovena vyšší kvůli ocenění možného rizika dané investice. Diskontní sazbu firmy

lze zjistit z výročních zpráv z předchozích let jako průměrnou hodnotu diskontních sazeb, které byly ve výpočtech ve zmíněných zprávách použity. Tato sazba by měla odrážet specifická rizika týkající se oboru, ve kterém společnost působí. Vývoj diskontních sazeb je uveden v následující tabulce.

*Tabulka 6: Vývoj diskontu ve společnosti ŠKODA AUTO a.s.*

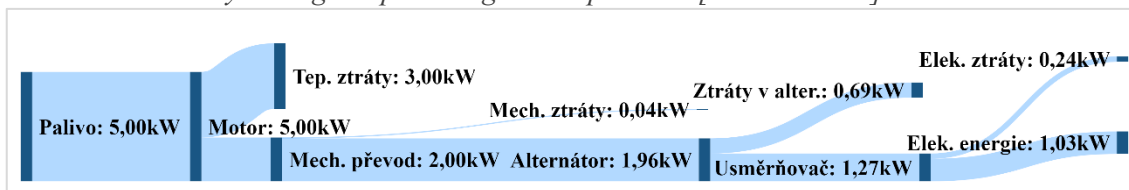
Rok	Diskontní sazba
2015	6,5 %
2016	5,4 %
2017	5,8 %
2018	5,5 %
Ø	5,8 %

V tomto případě (nahrazování silnějších průřezů vodičů) se však nejedná o tak rizikovou investici, a proto diskontní sazbu zvolím nižší, než jaká je používána ve společnosti ŠKODA AUTO a.s., ale zároveň vyšší než pro státní dluhopisy nebo terminované vklady. Odpovídající diskontní sazba pro tento investiční záměr je dle mého názoru **3,5 %**.

## 9.5. Výroba elektrické energie v automobilu

Elektrická energie v automobilu není zadarmo. Stejně jako kinetická energie nutná k pohybu vozu i tato pochází ze spalovaného paliva a je možné ji peněžně vyčíslit nebo v tomto případě převést na emisní ekvivalent. V celém procesu přeměny chemické energie paliva na elektrickou energii je rozhodující jeho účinnost. Pomocí ní můžeme při znalosti potřebného elektrického výkonu vypočítat okamžitý výkon, který musíme získat spálením paliva v motoru. Při zachování výkonu vozidla se jedná o výkon navíc, který se projeví zvýšenou spotřebou. V tabulce č. 7 jsem uvedl typické průměrné hodnoty účinností jednotlivých prvků celého procesu energetické přeměny. Nejprve je palivo v motoru spáleno a převedeno na pohybovou energii. Pomocí mechanického převodu, kterým bývá klínový řemen, je touto energií roztáčen alternátor. Ten vyrábí střídavý elektrický proud, který je následně usměrňován 3f neřízeným můstkovým usměrňovačem na stejnosměrný. Tímto způsobem je dodávána energie do elektrických obvodů automobilu a dobíjena baterie, která plní funkci stabilizátoru napětí. Celý tento ztrátový proces jsem pro lepší představu zobrazil pomocí Sankeyova diagramu, kdy je okamžitý výkon získaný spálením palivové směsi 5 kW. Jak je vidět z diagramu, využitelný elektrický výkon na konci procesu je pouze 1,03 kW, zbytek ztratíme vlivem různých typů ztrát.[33]

Obrázek 14: Sankeyův diagram pro energetickou přeměnu [vlastní tvorba]



Tabulka 7: Celková účinnost energetické přeměny

spalovací motor (benzínový)	40 %
mechanický převod (klínový řemen)	98 %
alternátor (synchronní) <sup>3</sup>	65 %
usměrňovač (3f neřízený můstkový)	81 %
celková účinnost	<b>20,6 %</b>

Na základě znalosti celkové účinnosti energetické přeměny jsem vypočetl cenu za 1 kWh vyrobené elektrické energie: **17,4 Kč/kWh**. Při výpočtu je uvažována průměrná výhřevnost benzínu 8,89 kWh/l a cena 31,90 Kč/l. Z výrobní ceny je patrné, že vzhledem k cenám za silovou elektřinu je takový způsob výroby energie ekonomicky neefektivní, což je ovlivněno malou účinností celé přeměny.

### 9.5.1. Vyjádření elektrických ztrát pomocí emisí

Aby bylo možné vyjádřit elektrické ztráty pomocí emisí, je potřeba znát závislost spotřeby na výkonu motoru. Pro tento výpočet jsem však použil průměrný výkon vozidla při cyklu měření emisí a považoval ho za dostačující. Od roku 2017 se k měření emisí a spotřeby využívá nová metodika WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures), která nahradila dřívější NEDC (New European Driving Cycle). Ta má za cíl přinést reálnější technické údaje o spotřebě paliva a emisích vozidel, které poslouží ke kontrole dodržování flotilových emisních limitů. V porovnání s předchozí zkouškou je tato mnohem komplexnější a časově delší.

To, jak cyklus metodiky WLTP probíhá, závisí především na parametru daného vozidla. Většina evropských vozidel spadá do kategorie s výkonovou hmotností více než 34 kW/t. Testovací cyklus pro vozidla spadající do této třídy se skládá ze 4 částí. Tyto části napodobují provoz vozidla ve městě (popojíždění v kolonách), mimo město, na dálnicích (rychlost

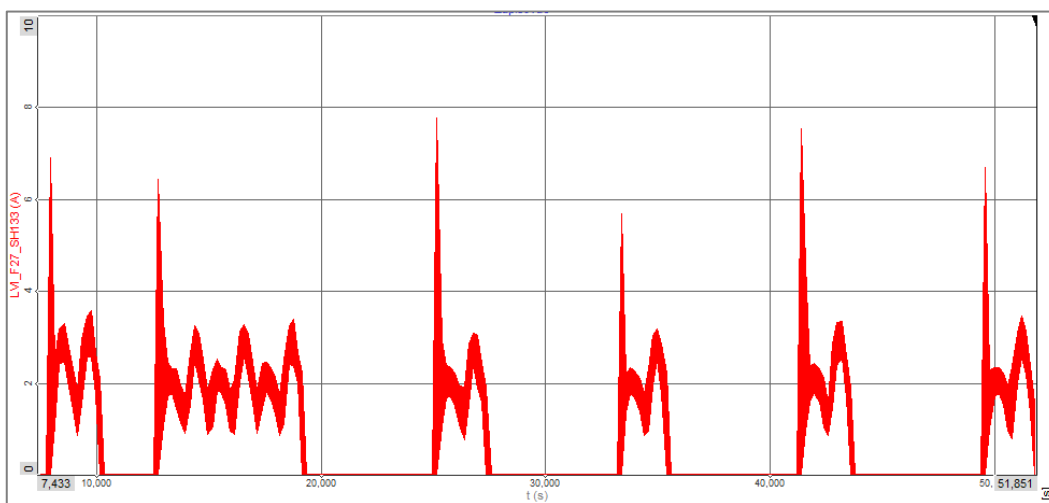
<sup>3</sup> Maximální účinnost dnes v automobilech používaných alternátorů je 70–80 % [34]. Jejich průměrnou účinnost během provozu uvažují 65 %, tato hodnota je oproti klasickým elektrickým strojům nižší, a to z důvodu proměnných otáček a proměnného výstupního proudu alternátoru.

130 km/h) atd. Průměrný výkon motoru během všech těchto částí je 7500 W. Za zjednodušujících předpokladů lze z tohoto údaje a známé udávané spotřeby vozidla určit, o kolik se zvýší spotřeba paliva při navýšení odebíraného elektrického výkonu z alternátoru, a také o kolik se zvýší emise.[35, 36]

Přesné vyčíslení průměrného navýšení ztrát vlivem použití slabšího průřezu vodiče je velmi obtížné a pokrylo by samostatně celou bakalářskou práci. Z tohoto důvodu, jsem zde pouze naznačil, jakým způsobem by se dalo při vyčíslování ztrát postupovat a vystačil jsem si pouze s jejich hrubým odhadem.

K tomu, abychom byli schopni vyčíslit střední hodnotu navýšení ztrát je potřeba znát všechny zátěžové diagramy spotřebičů napájenými daným průřezem vodiče. Ty nám poskytnou informaci o odebíraném proudu a jeho povaze. Dále bychom také museli znát vytíženost daného spotřebiče. Jako příklad jsem uvedl graf napájení motorku zadního stěrače za běžného nedeštivého dne, kde pouze ostříkneme zadní sklo za účelem smytí nečistot. Z grafu je vidět, že odebíraný špičkový proud má hodnoty okolo 7 A (při blokaci i 10 A).

Graf 12: Průběh odebíraného proudu motorku zadního stěrače během stírání



Efektivní hodnota stejnosměrného proudu během jednoho stíracího cyklu, který trvá přibližně 45 sekund, je  $I_{ef} = 1,355$  A. Odpor vodivého jádra vodiče při 20 °C bych mohl určit pomocí výpočtu podle rovnice č. 5 anebo ho lze rovnou odečíst z tabulky č. 4. (pro průřez vodiče 0,35 mm<sup>2</sup> je to 54,4 mΩ/m, pro průřez vodiče 0,5 mm<sup>2</sup> je to 37,1 mΩ/m). Tento rozdíl se projeví nárůstem středního ztrátového výkonu. Ve výpočtu odhaduji, že zadní stěrač je v provozu 5 % doby životnosti vozu, a proto počítám s dobou  $T_Z = 900$  s. Poté lze pro délku vodiče 1 m psát:

$$P_{stř,z} = \frac{1}{T_{ž}} \int_0^{T_{ž}} p(t) dt = \frac{1}{T_{ž}} \int_0^{T_{ž}} R \cdot I_{ef}^2 dt \quad (9)$$

$$\Delta P_{stř,z} = \frac{1}{T_{ž}} \int_0^{T_{ž}} R_{0,35} \cdot I_{ef}^2 dt - \frac{1}{T_{ž}} \int_0^{T_{ž}} R_{0,5} \cdot I_{ef}^2 dt \quad (10)$$

Po dosazení:

$$\Delta P_{stř,z} = \frac{1}{900} \cdot 0,0544 \cdot 1,355^2 \cdot 45 - \frac{1}{900} \cdot 0,0371 \cdot 1,355^2 \cdot 45 \quad (11)$$

$$\Delta P_{stř,z} = 0,0050 - 0,0034 = 0,0016 \text{ W} \quad (12)$$

V dalším výpočtu pracuji s hodnotami průměrné spotřeby u nových vozů ŠKODA s benzínovým motorem, konkrétně 4,9 l/100 km a emisním ekvivalentem 110 g/km. Průměrné navýšení středních ztrát, které vznikne náhradou jednoho metru vodiče slabším, jsem odhadl na 0,005 W a předpokládám, že si napájený spotřebič zachovává potřebný výkon. Pro větší přehlednost jsem uvedl hodnoty v tabulce, kde jsou všechny hodnoty vztaženy na 1 metr nahrazeného vodiče.

Tabulka 8: Vyjádření elektrických ztrát pomocí emisí

průměrný výkon motoru	7500	W
spotřeba benzínu	0,049	l/km
emise CO <sub>2</sub>	110	g/km
odhadovaný nárůst ztrát ve vodiči	0,005	W
účinnost přeměny mechanické energie na elektrickou	51,597	%
ekvivalent výkon/palivo	1 W = 6,5 · 10 <sup>-6</sup>	l/km
ekvivalent výkon/emise	1 W = 0,0147	g/km
nutné navýšení výkonu motoru pro pokrytí ztrát	0,00969	W
zvýšená produkce emisí	1,42443 · 10 <sup>-4</sup>	g/km
peněžní ekvivalent zvýšené produkce emisí	<b>0,01353</b>	€

## 9.6. Zjednodušující předpoklady

Při svém výpočtu vědomě neuvažuji skutečnost, že při použití slabších vodičů namísto silnějších by mohla být při jejich montáži zvýšena zmetkovitost a také, že by mohla být snížena samotná odolnost vodičů, která by se mohla projevit na nutných opravách vozidel. Dále počítám s potenciální náhradou vodičů u 250 000 vozů s benzínovým motorem. S výše zmíněnými

účinnostmi počítám záměrně jako se středními hodnotami, i když se jejich hodnota s různými otáčkami a výkonem motoru mění. Závislost spotřeby paliva na výkonu ve výpočtech považuji za lineární. Ve výpočtech neuvažuji daně.

## 9.7. Zhodnocení efektivnosti investice

Aby bylo možné objektivně zhodnotit, zdali náhradou silnějšího průřezu vodiče za slabší ušetří společnost ŠKODA AUTO a.s. peníze, je třeba provést zhodnocení nákladů a úspor, respektive jejich změn. K tomu je potřeba definovat funkci, pomocí níž lze výpočet a zhodnocení provést. Nejlepším způsobem, jak zhodnotit ekonomickou efektivnost tohoto technického návrhu, je použít k výpočtu roční ekvivalentní hotovostní tok. Výsledkem této funkce je číselná hodnota v základních peněžních jednotkách. Investici do návrhu redukce vodičů bych doporučil k realizaci v případě, že tato funkce vyjde kladná (nárůst nákladů uvažuji se záporným znaménkem a úsporu s kladným). Snahou je výsledek této funkce maximalizovat. Změnu emisních nákladů  $\Delta N_{CO_2}$  uvažuji pouze u scénáře, kdy jsme nad emisním limitem 95 g/km.

$$RCF = \Delta N_i \cdot a(r, T_z) + k \cdot (\Delta N_{CO_2} + \Delta N_m) \quad (13)$$

$\Delta N_i$	navýšení investičních nákladů
$a(r, T_z)$	anuita za dobu životnosti projektu $T_z$ a při diskontu $r$ $(a = \frac{q^{T_z} \cdot (q-1)}{q^{T_z} - 1}, q = 1 + r)$
$\Delta N_{CO_2}$	změna emisních nákladů vztažená na náhradu 1 m vodiče
$\Delta N_m$	úspora materiálových nákladů vztažená na náhradu 1 m vodiče
$k$	počet vyrobených vozů, ve kterých můžu nahradit průřezy

Pro výpočet jsem využil stejné údaje jako uvádím v podkapitolách 9.1–9.6. Pro přehlednost jsem je všechny shrnul v následující tabulce i s vypočtenými ročními ekvivalentními cashflow. Zatímco peněžní ekvivalent úspory  $CO_2$ , viz tabulka č. 9, znamená vyjádření úspory z důvodu snížení hmotnosti, tak peněžní ekvivalent nárůstu  $CO_2$  je vyjádřením nárůstu spotřeby a produkce emisí vlivem větších ztrát ve vodiči.

### 9.7.1. Scénář I. – uvažování emisních poplatků

Tabulka 9: RCF – scénář I.

délka nahrazeného vodiče [m]	0	1	2	3	4
úspora na nákupu tenčích vodičů $\Delta N_m$ [€]	-	0,003	0,006	0,009	0,012
úspora hmotnosti [g]	-	1,8	3,6	5,4	7,2
úspora CO <sub>2</sub> [g/km]	-	0,00014	0,00029	0,00043	0,00058
peněžní ekvivalent úspory CO <sub>2</sub> – hmotnost [€]	-	0,01368	0,02736	0,04104	0,05472
zvýšená produkce emisí vlivem nárůstu zrát ve vodiči [g/km]	-	0,00017	0,00034	0,0005	0,00067
peněžní ekvivalent nárůstu CO <sub>2</sub> – ztráty [€]	-	0,01353	0,0271	0,0406	0,06396
$\Delta N_{CO_2}$ [€]	-	0,00015	0,00029	0,00044	0,00059
odměna pracovníka za 320 h práce - 40 [€/h]	12 800				
vydání technických změn a úprava kusovníku [€]	15 000				
náklady dodavatele [€]	5000				
celková investice $\Delta Ni$ [€]	32 800				
počet vyrobených vozů	250 000				
doba životnosti investice [r], diskontní sazba [%]	8 / 3,5				
anuita (r = 0,035, Tž = 8) [-]	0,145476647				
<b>RCF<sub>1</sub> [€]</b>	-	<b>-3985</b>	<b>-3198</b>	<b>-2411</b>	<b>-1624</b>

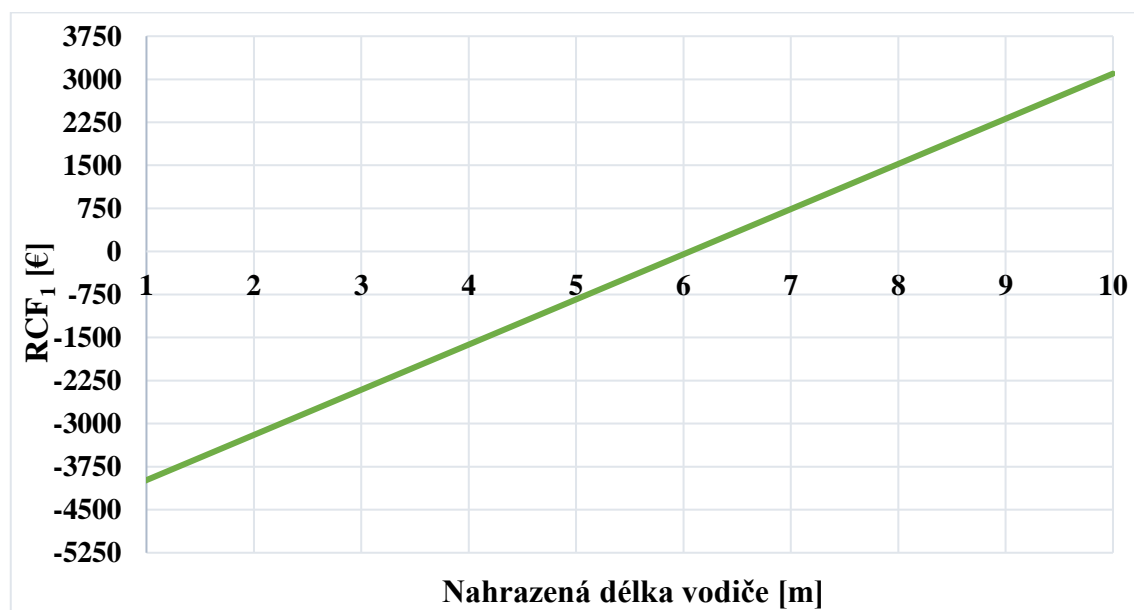
Tabulka 10 pokračování: RCF – scénář I.

5	6	7	8	9	10
0,015	0,018	0,021	0,024	0,027	0,03
9	10,8	12,6	14,4	16,2	18
0,00072	0,00086	0,00101	0,00115	0,0013	0,00144
0,0684	0,08208	0,09576	0,10944	0,12312	0,1368
0,00084	0,00101	0,00118	0,00135	0,00151	0,00168
0,0677	0,0812	0,0947	0,1083	0,1218	0,1353
0,00074	0,00089	0,00104	0,00118	0,00133	0,00148
12800					
15000					
5000					
32 800					
250000					
8 / 3,5					
0,145476647					
<b>-837</b>	<b>-50</b>	<b>737</b>	<b>1524</b>	<b>2311</b>	<b>3098</b>



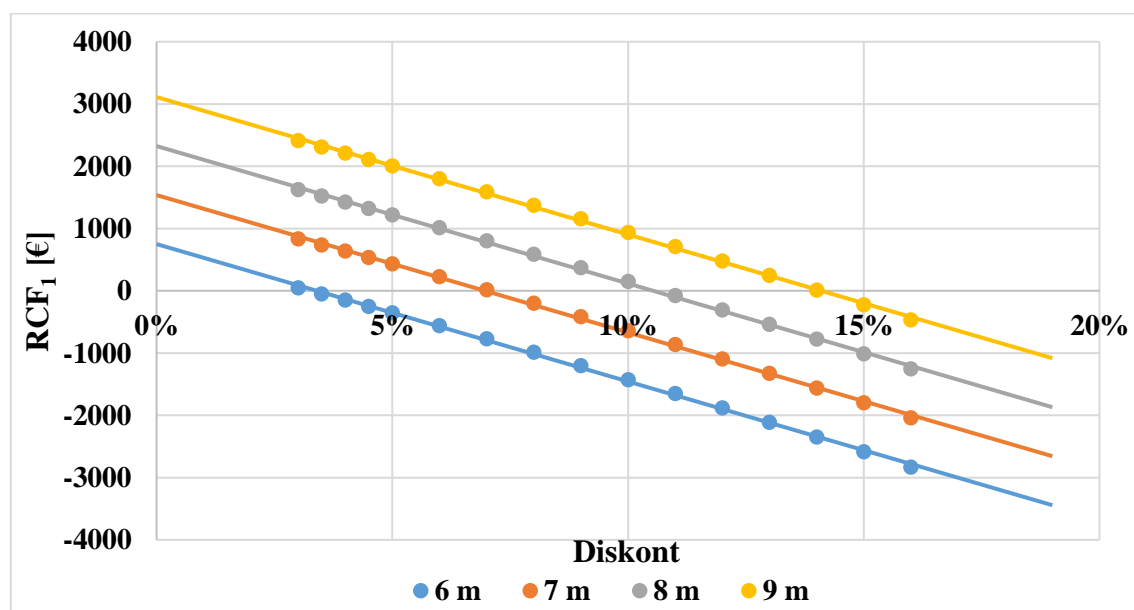
Závislost ročního ekvivalentního hotovostního toku znázorňuje graf č. 13. Se zvyšujícím se počtem metrů nahrazeného vodiče roste RCF. Pomocí nástroje v Microsoft Excel „Citlivostní analýza“ jsem určil bod zvratu, při kterém je  $RCF = 0$ . Aby investice byla výhodná, museli bychom v jednom voze nahradit alespoň 6,06 m vodiče průřezu  $0,5 \text{ mm}^2$  průřezem  $0,35 \text{ mm}^2$ . Právě při takové náhradě bychom zajistili výnos kapitálu ve výši vstupního požadavku 3,5 %.

Graf 13: Závislost ročního ekvivalentního cashflow na nahrazené délce vodiče s uvážením emisí



Následující graf č. 14 zachycuje citlivostní analýzu na změnu diskontu. Vybral jsem si pro srovnání skutečnosti, ve kterých nahradím 6, 7, 8 a 9 metrů vodiče.

Graf 14: Závislost RCF na diskontní sazbě při různých délkách nahrazeného vodiče



Z grafu je patrné, že platí závislost, že se zvyšující se diskontní sazbou klesá pro jednotlivé skutečnosti RCF. Zatímco pro diskont 3,5 % je investice výhodná již při náhradě 6,06 m vodiče, tak při diskontu 7 % už je to 7 m nahrazeného vodiče. Pro diskonty vyšší než 14 % už není výhodná ani jedna ze zobrazených skutečností, protože roční ekvivalentní hotovostní tok jednotlivých skutečností je záporný.

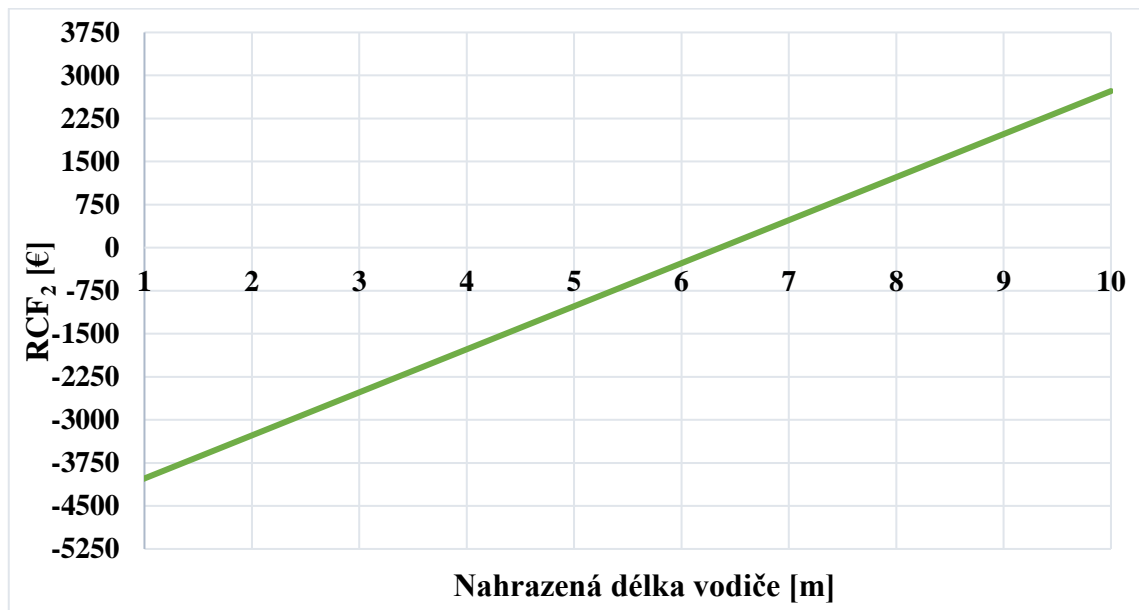
### 9.7.2. Scénář II. – neuvažování emisních poplatků

Tabulka 11: RCF – scénář II.

délka nahrazeného vodiče [m]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
úspora na nákupu tenčích vodičů $\Delta N_m$ [€]	-	0,003	0,006	0,009	0,012	0,015	0,018	0,021	0,024	0,027	0,03
odměna pracovníka za 320 h práce - 40 [€/h]	12 800										
vydání technických změn a úprava kusovníku [€]	15 000										
náklady dodavatele [€]	5000										
celková investice $\Delta N_i$ [€]	32 800										
počet vyrobených vozů	250 000										
doba životnosti investice [r], diskontní sazba [%]	8 / 3,5										
anuita ( $r = 0,035$ , $Tž = 8$ ) [-]	0,145476647										
<b>RCF<sub>2</sub> [€]</b>	-	<b>-4022</b>	<b>-3272</b>	<b>-2522</b>	<b>-1772</b>	<b>-1022</b>	<b>-272</b>	<b>478</b>	<b>1228</b>	<b>1978</b>	<b>2728</b>

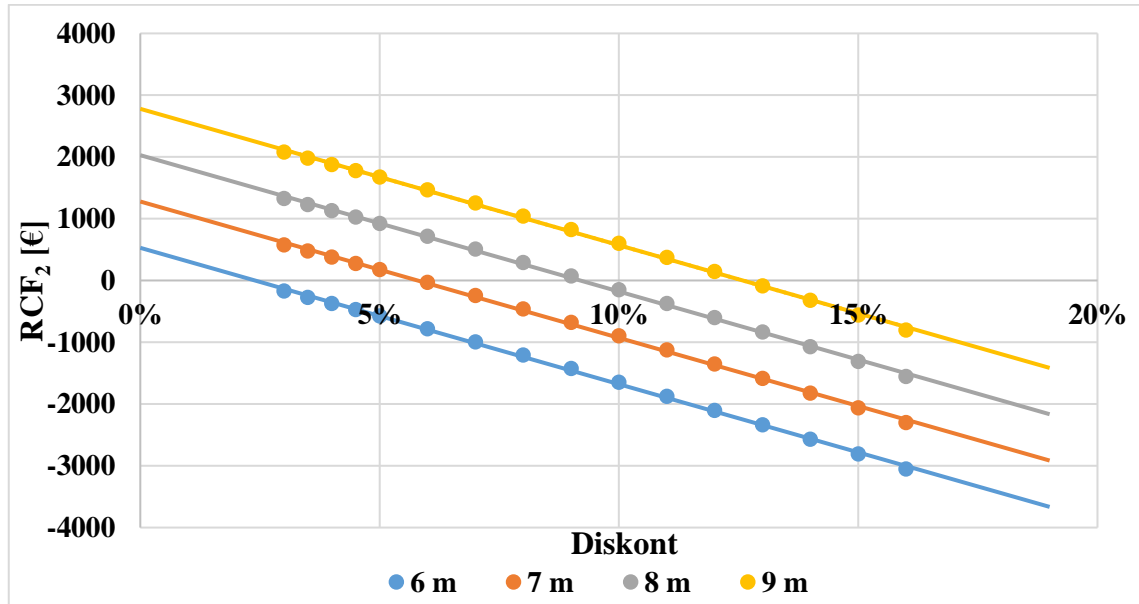
Závislost ročního ekvivalentního hotovostního toku bez uvažování emisních poplatků znázorňuje graf č. 15. I v tomto případě roste RCF<sub>2</sub> se zvyšujícím se počtem nahrazených metrů vodiče v jednom voze. Bod zvratu, při kterém je RCF<sub>2</sub> = 0, je v tomto případě 6,36 metru, což je téměř stejně, jako ve scénáři, kde uvažují emisní poplatky, a proto i grafické závislosti vypadají téměř shodně. Je to tím, že nárůst nákladů vlivem ztrát ve vodiči je prakticky shodný s úsporou, která vznikne díky snížení hmotnosti vozidla. Od hodnoty bodu zvratu k větším délkám nahrazeného vodiče je pro diskontní sazbu 3,5 % tato investice výhodná a zkracuje se její doba návratnosti.

Graf 15: Závislost ročního ekvivalentního cashflow na nahrazené délce vodiče bez uvažování emisních poplatků



Graf č. 16 zachycuje citlivostní analýzu na změnu diskontu. Pro srovnání jsem si vybral skutečnosti s nahrazenou délkou vodiče 6, 7, 8 a 9 metrů vodiče.

Graf 16: Závislost RCF<sub>2</sub> na diskontní sazbě při různých délkách nahrazeného vodiče

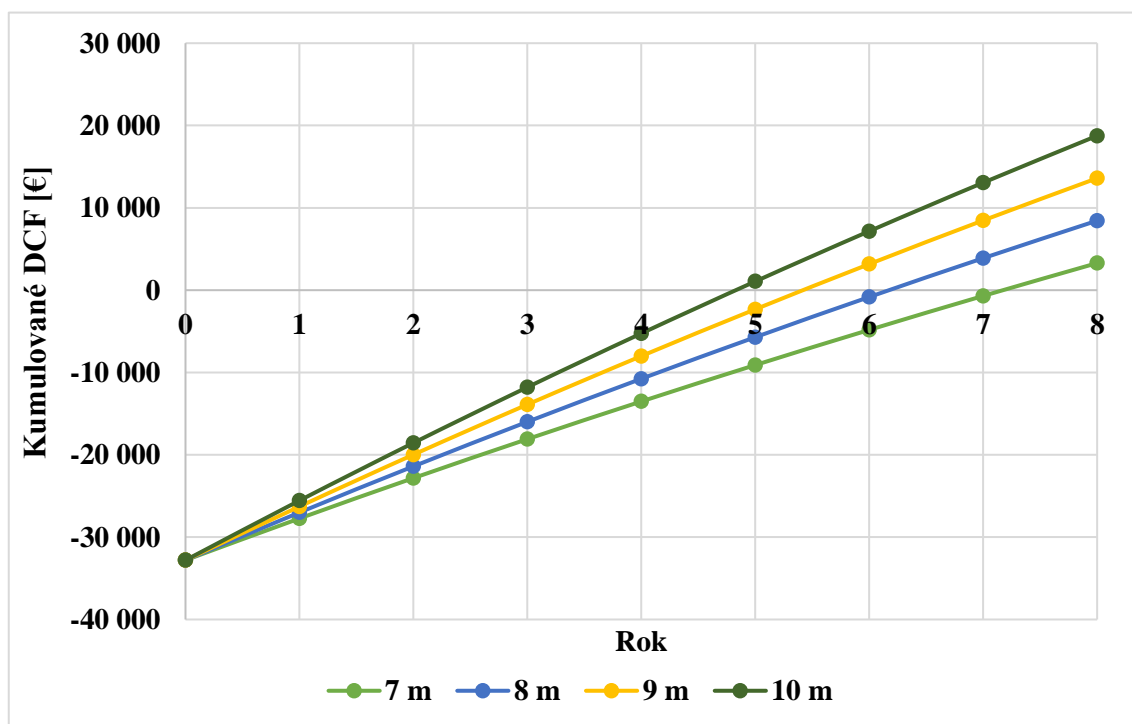


Stejně jako v předešlém scénáři, i zde se se zvyšující diskontní sazbou snižuje hodnota RCF. Jediný rozdíl je ten, že křivky pro jednotlivé skutečnosti jsou na rozdíl od Scénáře I. posunuty k nižším hodnotám RCF. To je dáno tím, že u tohoto scénáře je menší úspora financí na jeden metr nahrazeného vodiče. Z toho důvodu není výhodná ani jedna ze zobrazených skutečností již při diskontní sazbě 13 %.

## 9.8. Doba návratnosti investice

Jedním z dalších způsobů, jak ohodnotit investici, je doba návratnosti investice. V této metodě sledujeme, kdy naakumulované hodnoty očištěných hotovostních toků překročí investované finanční prostředky. Pro zachování časového rozložení peněz ve výpočtu uvažují diskontované cashflow, opět hodnotou 3,5 %. Při svém výpočtu počítám s tím, že výroba 250 000 vozů probíhá v jednotlivých letech lineárně. Tato metoda je pro rozhodování automobilky velmi důležitá, protože vzhledem ke strategii a politice společnosti ŠKODA AUTO a.s. se v této oblasti vývoje realizují pouze investice s dobou návratnosti kratší než jeden rok. Jelikož Scénář I. i Scénář II. dávají velmi podobné výsledky, rozhodl jsem se zhodnotit investici podle Scénáře II., kdy nejsou uvažovány emisní poplatky. Výpočty jsem provedl pro varianty, kdy se podaří nahradit 7, 8, 9 a 10 metrů vodiče, tedy varianty, kdy podle metody RCF při diskontu 3,5 % vychází investice efektivní. Výsledné kumulované hotovostní toky jsou zobrazeny v grafu č. 17. Doba návratnosti je hodnota na ose x, kdy se kumulované hotovostní toky rovnají nule.

Graf 17: Diskontovaná doba návratnosti investice



Z grafu je patrné, že s větším počtem metrů nahrazeného vodiče v jednom voze klesá doba návratnosti investice. Pomocí funkce „hledání řešení“ jsem určil, jaká by musela být délka nahrazeného vodiče průřezu  $0,35 \text{ mm}^2$  za průřez  $0,5 \text{ mm}^2$ , aby návratnost investice byla jeden rok nebo kratší. Tato hodnota vychází 45,3 m a více, což je přibližně 8,5 % a více z celkové délky vodiče průřezu  $0,5 \text{ mm}^2$  v jednom voze.

## 10. Závěr

V této práci jsem se podrobněji seznámil s problematikou dimenzování vodičů pro osobní automobily. V první části práce jsem si objasnil způsob provedení elektrické instalace v osobních automobilech a způsob, jakým se popisují vodiče tvořící tuto elektroinstalaci. Nejvíce jsem se zabýval rešerší v oblasti materiálů užívaných k výrobě vodivých jader a izolací vodičů pro elektrické instalace u osobních automobilů, protože právě od vlastností těchto materiálů se kritéria dimenzování odvíjejí. Čerpal jsem z mnoha různých zdrojů a sestavil tak přehled nejdůležitějších materiálů a jejich typických vlastností.

V praktické části své práce jsem provedl sérii měření na vybraných vodičích v závislosti na použité izolaci a okolních podmínkách. To jsem prováděl z toho důvodu, abych mohl ověřit, zdali vodiče používané ke tvorbě svazků elektrické instalace ve vozech ŠKODA splňují interní normu pro dimenzování vodičů. Z provedených měření usuzuji, že vybrané vzorky průřezů splňují dané požadavky, normě tedy vyhovují a jsou vhodně dimenzované. Na základě mého měření nelze však tyto výsledky více zobecnit, protože by bylo potřeba provést potřebná měření na více výrobních várkách daných průřezů a také na větším vzorku vodičů. Je však potřeba zmínit, že daná měření jsou velmi časově náročná, a proto se provádí jen zřídka pouze jako kontrolní. Dále jsem porovnal data od výrobce vodičů splňující mezinárodní normu s daty z interní normy. Chtěl jsem ověřit předpoklad, že interní automobilová norma je nastavena příliš přísně a vodiče půjde vzhledem k použité izolaci a okolní teplotě více zatížit. Tento předpoklad se však nenaplnil a ukázalo se, že daná interní norma vcelku odpovídá fyzikálnímu chování vodičů daných průřezů.

Na závěr praktické části jsem shrnul problematiku technického návrhu redukce průřezů vodičů v automobilu. To v sobě zahrnuje všechny předpoklady, které musí být splněny pro to, abychom mohli daný průřez v automobilu nahradit slabším průřezem, a také postup, jakým by se dalo postupovat v případě tvorby takového návrhu. Samotné provedení technického návrhu by mohlo být dalším tématem k pokračování této práce.

Ekonomickou část práce jsem věnoval především výpočtu efektivnosti investice do redukce průřezu vodičů z pohledu automobilky. Výpočet jsem provedl pro vodiče s největším potenciálem k redukci průřezu, aby bylo zřejmé, kolik metrů vodiče by se nám v automobilu muselo podařit nahradit a investice tak byla pro automobilku výhodná. Z výpočtů vyplývá, že při náhradě vodiče průřezu  $0,5 \text{ mm}^2$  průřezem  $0,35 \text{ mm}^2$ , nemá uvažování či neuvažování emisních poplatků při hodnocení efektivnosti investice zásadní vliv. Aby se společnosti ŠKODA AUTO a.s. vyplatilo investovat finanční prostředky do redukce průřezů vodičů, muselo by se podařit nahradit v jednom automobilu při uvažování emisních poplatků přes 6,06 metrů vodiče a při neuvažování přes 6,36 metrů vodiče průřezu  $0,5 \text{ mm}^2$  vodičem  $0,35 \text{ mm}^2$ , což se z mého pohledu jeví vzhledem k délce veškeré kabeláže ve voze reálné. Co je však vzhledem k politice společnosti nejdůležitější,

je doba návratnosti investice. Jelikož je pro společnost rozhodující, zdali se investice zaplatí během jednoho roku, nemůžu tuto investici do redukce vodičů automobilce doporučit. Muselo by se podařit nahradit na jednom voze alespoň 45,3 metrů vodiče, aby se investice splatila během jednoho roku, což je velmi nepravděpodobné.

Vypracováním této práce jsem nahlédl do současné problematiky dimenzování vodičů v automobilovém průmyslu a získal tak cenné zkušenosti do profesního života. Největším praktickým přínosem pro mě byla spolupráce s oddělením Vývoje svazků elektrické instalace ve ŠKODA AUTO a.s., kde jsem působil po dobu dvou let jako stážista a jež mi poskytlo cenné poznatky, čas a prostředky k vypracování bakalářské práce. Zpracováním zadaných úkolů jsem si tak mohl ověřit ve škole nabyté znalosti v praxi.

## Seznam použité literatury

- [1] LAVIČKA, Václav. V autoprůmyslu pracuje už více než 150 tisíc lidí. Podle nových dat si v průměru přijdou na 35 tisíc měsíčně. *Hospodářské noviny* [online]. 22. únor 2017 [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://byznys.ihned.cz/c1-65633890-pocet-lidi-zamestnanych-v-autoprumslyu-presahl-150-tisic-lidi-v-prumeru-si-prijdou-na-temer-35-tisic-mesicne>
- [2] *Dimenzování vodičů a kabelů* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/260/03.html>
- [3] Proudová zatížitelnost vodičů. *oEnergetice.cz* [online]. [vid. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/proudova-zatizitelnost-vodicu/>
- [4] *T 2 Elektrická zařízení motorových vozidel* [online]. [vid. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/160/02.html>
- [5] REIF, Konrad a ROBERT BOSCH GMBH, ed. *Batterien, Bordnetze und Vernetzung*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010. Bosch Fachinformation Automobil. ISBN 978-3-8348-1310-7.
- [6] GRUND, Ing. Antonín. *Elektrická instalace motorových vozidel*. B.m.: Střední odborná škola Josefa Sousedíka Vsetín. 2009
- [7] LEONI Automotive Cables. nedatováno, 92.
- [8] O'RIORDAN, David. Applications of high conductivity copper for electrical engineering. *Engineers Journal* [online]. 15. únor 2017 [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.engineersjournal.ie/2017/02/15/high-conductivity-copper/>
- [9] *CuETP* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.conductivity-app.org/alloy-sheet/33>
- [10] *Conductor materials: Alloy materials – LEONI* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.leoni-wire-products-solutions.com/en/materials/conductor-materials/alloy-materials/>
- [11] Copper Alloys: Information on Their Properties and Applications. *European Copper Institute* [online]. [vid. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://copperalliance.eu/about-copper/copper-and-its-alloys/alloys/>
- [12] *copper\_silver.pdf* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: [https://d3gx8i893xzz0e.cloudfront.net/fileadmin/automotive\\_cables/publications/data\\_sheet/copper\\_silver.pdf?1475650294](https://d3gx8i893xzz0e.cloudfront.net/fileadmin/automotive_cables/publications/data_sheet/copper_silver.pdf?1475650294)
- [13] *Alloys: LEONI Histral® H79 – LEONI* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.leoni-wire-products-solutions.com/en/materials/conductor-materials/leoni-histral-h-high-strength-alloys/leoni-histral-h79/>
- [14] *Alloys: LEONI Histral® H64 – LEONI* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.leoni-wire-products-solutions.com/en/materials/conductor-materials/leoni-histral-h-high-strength-alloys/leoni-histral-h64/>

- [15] *copper\_magnesium.pdf* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: [https://d3gx8i893xzz0e.cloudfront.net/fileadmin/automotive\\_cables/publications/data\\_sheet/copper\\_magnesium.pdf?1475650341](https://d3gx8i893xzz0e.cloudfront.net/fileadmin/automotive_cables/publications/data_sheet/copper_magnesium.pdf?1475650341)
- [16] *copper\_thin.pdf* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: [https://d3gx8i893xzz0e.cloudfront.net/fileadmin/automotive\\_cables/publications/data\\_sheet/copper\\_thin.pdf?1475650458](https://d3gx8i893xzz0e.cloudfront.net/fileadmin/automotive_cables/publications/data_sheet/copper_thin.pdf?1475650458)
- [17] *Alloys: LEONI Histral® H72 – LEONI* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.leoni-wire-products-solutions.com/en/materials/conductor-materials/leoni-histral-h-high-strength-alloys/leoni-histral-h72/>
- [18] DEVELOPMENT@TVARWEBU.CZ, Tvar Webu, design by stoupa bat | WWW.STOUPABAT.CZ a IN-EL R.O spol s. *Hliníkové vodiče a jejich používání* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.in-el.cz/referat>
- [19] KOCH, S. a H. ANTREKOWITSCH. Aluminum Alloys for Wire Harnesses in Automotive Engineering. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* [online]. 2007, **152**(2–3), 62–67. ISSN 0005-8912, 1613-7531. Dostupné z: doi:10.1007/s00501-007-0275-z
- [20] *Kabely a vodiče* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/08.html>
- [21] BLACKWELL, Wiley. *Electric Cables Handbook, 3rd Edition*. B.m.: BICC Cables Ltd, nedatováno. ISBN 978-0-632-04075-9.
- [22] *uloha\_5\_elektricka-pevnost-izolacnich-folii.pdf* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/105294/mod\\_resource/content/1/uloha\\_5\\_elektricka-pevnost-izolacnich-folii.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/105294/mod_resource/content/1/uloha_5_elektricka-pevnost-izolacnich-folii.pdf)
- [23] FLUY, Leoni. [www.leoni-automotive-cables.com](http://www.leoni-automotive-cables.com) | Business Segment Automotive Standard Cables. nedatováno, 1.
- [24] *Izolanty a dielektrika* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/06.html>
- [25] *Termoplasty – základní druhy* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/18.html>
- [26] *Struktura polymerů a její vliv na vlastnosti* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html>
- [27] *\_ps\_176POLYETHYLEN.pdf* [online]. [vid. 2018-12-18]. Dostupné z: [https://www.vyrobkyzplastu.cz/fotky33000/fotov/\\_ps\\_176POLYETHYLEN.pdf](https://www.vyrobkyzplastu.cz/fotky33000/fotov/_ps_176POLYETHYLEN.pdf)
- [28] *Coroplast\_Wires\_and\_Cables\_EN.pdf* [online]. [vid. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://www.coroplast.de/fileadmin//user\\_upload/Coroplast\\_Wires\\_and\\_Cables\\_EN.pdf](https://www.coroplast.de/fileadmin//user_upload/Coroplast_Wires_and_Cables_EN.pdf)
- [29] *FLRY\_cs\_en.pdf* [online]. [vid. 2019-05-15]. Dostupné z: [http://www.kablovrchlabi.cz/upload/128963/pdf/FLRY\\_cs\\_en.pdf](http://www.kablovrchlabi.cz/upload/128963/pdf/FLRY_cs_en.pdf)
- [30] GMBH, finanzen net. Copper price in Euro | Markets Insider. *markets.businessinsider.com* [online]. [vid. 2019-04-09]. Dostupné z: <https://markets.businessinsider.com/commodities/copper-price/euro>



- [31] Expert: Zpřísnění limitů pro auta sníží emise CO<sub>2</sub> o osm procent. *Ekolist.cz* [online]. [vid. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/expert-zprisneni-limitu-pro-auta-snizi-emise-co2-o-osm-procent>
- [32] HTTP://WWW.WLIST.CZ, wList.cz; Emisní limity EU pro rok 2020 budou pro výrobce větší problém, než se zdálo. *Autoforum.cz* [online]. [vid. 2019-04-09]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/zajimavosti/emisni-limity-eu-pro-rok-2020-budou-pro-vyrobce-vetsi-problem-nez-se-zdalo/>
- [33] BRADFIELD, Mike. Improving Alternator Efficiency Measurably Reduces Fuel Costs. nedatováno, 32.
- [34] *Alternator (automotive)* [online]. 2018 [vid. 2019-05-01]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Alternator\\_\(automotive\)&oldid=852516444](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Alternator_(automotive)&oldid=852516444)
- [35] VDA [online]. [vid. 2019-04-30]. Dostupné z: <http://vda.de>
- [36] ZPRÁVY, Tiskové. Nové metodiky měření: WLTP a RDE Reforma s výhodou pro zákazníky. *Autobible.cz* [online]. 10. únor 2018 [vid. 2019-04-30]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/nove-metodiky-mereni-wltp-rde-reforma-vyhodou-zakazniky/>

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Elektroinstalace v automobilu – jednovodičová metoda [5] .....	16
Obrázek 2: Svazek vodičů [interní materiál ŠA] .....	17
Obrázek 3: Svazek vodičů [interní materiál ŠA] .....	17
Obrázek 4: Vliv některých nečistot na elektrickou vodivost Cu – ETP [8] .....	21
Obrázek 5: Změna pevnosti v tahu čisté mědi v závislosti na čase [10] .....	22
Obrázek 6: Vliv příměsí na elektrickou vodivost mědi [8] .....	23
Obrázek 7: Rozmezí dovolených teplot pro dlouhodobé namáhání (3000 hodin) [vlastní tvorba] .....	28
Obrázek 8: Pracovní prostředí softwaru IMC Studio s jednotlivými průběhy měřených veličin v reálném čase [interní materiál ŠA] .....	33
Obrázek 9: Měřicí pracoviště [vlastní materiál] .....	35
Obrázek 10: Pracovní oblasti vodičů průřezů 0,35 mm <sup>2</sup> a 0,5 mm <sup>2</sup> [vlastní tvorba] .....	46
Obrázek 11: Nelicencované pojistky 20 a 30 A při 160 % jmenovitého proudu [interní materiál ŠA] .....	47
Obrázek 12: Uložení elektrické instalace ve voze [interní materiál ŠA] .....	48
Obrázek 13: Vývoj ceny mědi mezi roky 2016 - 2019 [28] .....	50
Obrázek 14: Sankeyův diagram pro energetickou přeměnu .....	52

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Popisování vodičů [7] .....	18
Tabulka 2: Příklad popisu vodiče [7] .....	19
Tabulka 3: Porovnání materiálů – charakteristiky [7] .....	26
Tabulka 4: Vybrané typy průřezů vodičů pro vlastní měření .....	32

Tabulka 5: Maximální zatížení vodičů pro různé teploty okolí .....	38
Tabulka 6: Vývoj diskontu ve společnosti .....	51
Tabulka 7: Celková účinnost energetické přeměny .....	52
Tabulka 8: Vyjádření elektrických ztrát pomocí emisí .....	54
Tabulka 9: RCF – scénář I. ....	56
Tabulka 10 pokračování: RCF – scénář I. ....	56
Tabulka 11: RCF – scénář II. ....	58

## Seznam grafů

Graf 1: Porovnání hmotností vodičů jednotlivých průřezů v automobilu [interní materiál].....	26
Graf 2: Závislost $T = f(I_z)$ při teplotě okolí 23 °C .....	36
Graf 3: Závislost $T = f(I_z)$ při teplotě okolí 55 °C .....	36
Graf 4: Závislost $T = f(I_z)$ při teplotě okolí 70 °C .....	37
Graf 5: Závislost $T = f(I_z)$ při teplotě okolí 85 °C .....	37
Graf 6: Průřez vodiče 0,35 mm <sup>2</sup> .....	39
Graf 7: Průřez vodiče 0,5 mm <sup>2</sup> .....	40
Graf 8: Průřez vodiče 0,75 mm <sup>2</sup> .....	41
Graf 9: Průřez vodiče 1 mm <sup>2</sup> .....	42
Graf 10: Průřez vodiče 1,5 mm <sup>2</sup> .....	43
Graf 11: Průřez vodiče 2,5 mm <sup>2</sup> .....	44
Graf 12: Průběh odebíraného proudu motorku zadního stěrače během stírání .....	53
Graf 13: Závislost ročního ekvivalentního cashflow na nahrazené délce vodiče s uvažováním emisí .....	57
Graf 14: Závislost RCF na diskontní sazbě při různých délkách nahrazeného vodiče .....	57
Graf 15: Závislost ročního ekvivalentního cashflow na nahrazené délce vodiče bez uvažování emisních poplatků .....	59
Graf 16: Závislost RCF <sub>2</sub> na diskontní sazbě při různých délkách nahrazeného vodiče .....	59
Graf 17: Diskontovaná doba návratnosti investice .....	60

## Seznam rovnic

Rovnice (1) Výkonová bilance vodiče .....	12
Rovnice (2) Výkonová bilance vodiče 2 .....	13
Rovnice (3) Výpočet Jouleových ztrát .....	13
Rovnice (4) Výpočet odporu vodiče .....	13
Rovnice (5) Výpočet odporu vodiče 2 .....	14
Rovnice (6) Výkon odvedený konvekcí.....	14
Rovnice (7) Výkon odvedený radiací .....	15
Rovnice (8) Výpočet proudové zatížitelnosti.....	15
Rovnice (9) Vzorec pro výpočet ztrát .....	54
Rovnice (10) Vzorec pro výpočet nárůstu ztrát .....	54
Rovnice (11) Výpočet nárůstu ztrát .....	54
Rovnice (12) Výpočet nárůstu ztrát 2 .....	54
Rovnice (13) Výpočet RCF.....	55

## Příloha A – naměřené a vypočtené hodnoty

Teplota okolí													
2,5 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	256	295	335	359	387	415	445	462	477	495	502	
	Proud [A]	25	28	31	33	35	37	39	40	41	42	42,5	
	Teplota absolutní [°C]	51,6	59,3	67,8	72,5	79,3	86,7	93,7	97,9	101,6	103,7	106,5	
	Rezistivita [Ω.m]	0,01024	0,01054	0,01081	0,01088	0,01106	0,01122	0,01141	0,01155	0,01163	0,01179	0,01181	
1,5 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	260	314	374	440	489	526						
	Proud [A]	18	21	24	27	29	31						
	Teplota absolutní [°C]	53,3	63	74,3	87,2	98,3	106						
	Rezistivita [Ω.m]	0,01444	0,01495	0,01558	0,01630	0,01686	0,01697						
1 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	285	336	389	446	509	542	577					
	Proud [A]	14	16	18	20	22	23	25					
	Teplota absolutní [°C]	51,7	59,5	67,8	77,3	87,6	94,7	107,2					
	Rezistivita [Ω.m]	0,02036	0,02100	0,02161	0,02230	0,02314	0,02357	0,02308					
0,75 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	297	330	363	398	435	473	513	556	603	650	675	687
	Proud [A]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	20,5	20,7
	Teplota absolutní [°C]	47,5	51,1	55	59,4	64,3	70,4	76,6	82,9	90,4	97,2	102,2	104,8
	Rezistivita [Ω.m]	0,02700	0,02750	0,02792	0,02843	0,02900	0,02956	0,03018	0,03089	0,03174	0,03250	0,03293	0,03319
0,5 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	365	413	465	519	577	637	703	774	812			
	Proud [A]	9	10	11	12	13	14	15	16	16,5			
	Teplota absolutní [°C]	47,5	53	59,3	65,4	72,7	80,8	89,4	99,3	105,2			
	Rezistivita [Ω.m]	0,04056	0,04130	0,04227	0,04325	0,04438	0,04550	0,04687	0,04838	0,04921			
0,35 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	392	461	533	603	693	783	881	989				
	Proud [A]	7	8	9	10	11	12	13	14				
	Teplota absolutní [°C]	44,3	51,3	58,5	66	76,1	85,8	95,2	107,4				
	Rezistivita [Ω.m]	0,05600	0,05763	0,05922	0,06030	0,06300	0,06525	0,06777	0,07064				

Teplota 55 °C												
2,5 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	331	359	384	415	444	470	484				
	Proud [A]	26	28	30	32	34	36	37,5				
	Teplota absolutní [°C]	73	76	82,5	86	91	99	106				
	Rezistivita [Ω.m]	0,01273	0,01282	0,01280	0,01297	0,01306	0,01306	0,01291				
1,5 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	294	331	371	392	402	413	423	434			
	Proud [A]	18,5	20,5	22,5	23,5	24	24,5	25	25,5			
	Teplota absolutní [°C]	82	89,1	95,3	99,4	101,2	102,9	104,5	106,5			
	Rezistivita [Ω.m]	0,01589	0,01615	0,01649	0,01668	0,01675	0,01686	0,01692	0,01702			
1 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	312	338	365	392	420	449	480	510	527		
	Proud [A]	14	15	16	17	18	19	20	21	21,5		
	Teplota absolutní [°C]	77,1	81,2	85	87,3	91,4	95,1	99,7	104,9	107,9		
	Rezistivita [Ω.m]	0,02229	0,02253	0,02281	0,02306	0,02333	0,02363	0,02400	0,02429	0,02451		
0,75 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	428	482	539	599	630	548	570				
	Proud [A]	12	13	14	15	16	17	17,5				
	Teplota absolutní [°C]	80,6	85	89	94	95,9	101,5	105				
	Rezistivita [Ω.m]	0,03567	0,03708	0,03850	0,03993	0,03938	0,03224	0,03257				
0,5 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	428	482	539	599	630						
	Proud [A]	9,5	10,5	11,5	12,5	13						
	Teplota absolutní [°C]	81	87,5	93,6	101,1	105,9						
	Rezistivita [Ω.m]	0,04505	0,04590	0,04687	0,04792	0,04846						
0,35 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	392	461	533	603	693	783					
	Proud [A]	7	8	9	10	10,5	11					
	Teplota absolutní [°C]	74,1	81,4	88,3	96,1	100,6	105,1					
	Rezistivita [Ω.m]	0,05600	0,05763	0,05922	0,06030	0,06600	0,07118					

Teplota 70 °C										
2,5 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Proud [A]	24	25	26	27	28	29	29,5		
	Teplota absolutní [°C]	89,7	92	95,5	100	103	105	105,9		
	Rezistivita [Ω.m]	-	-	-	-	-	-	-	-	
1,5 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	301	341	363	384	396				
	Proud [A]	18	20	21	22	22,5				
	Teplota absolutní [°C]	92,1	98,4	101,4	104,3	106,1				
	Rezistivita [Ω.m]	0,01672	0,01705	0,01729	0,01745	0,01760				
1 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	301	315	328	342	355	369	383	397	
	Proud [A]	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	
	Teplota absolutní [°C]	90,8	93	94,9	96,9	98,7	101,3	103,2	105,6	
	Rezistivita [Ω.m]	0,02315	0,02333	0,02343	0,02359	0,02367	0,02381	0,02394	0,02406	
0,75 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	305	341	360	378	397				
	Proud [A]	11	13	13,5	14	14,5				
	Teplota absolutní [°C]	91,3	96,8	100,6	103,6	106,8				
	Rezistivita [Ω.m]	0,02773	0,02623	0,02667	0,02700	0,02738				
0,5 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	420	447	474	502	530				
	Proud [A]	9	9,5	10	10,5	11				
	Teplota absolutní [°C]	94,6	97,5	100,5	103,5	106,6				
	Rezistivita [Ω.m]	0,04667	0,04705	0,04740	0,04781	0,04818				
0,35 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	426	464	502	541	582	624	667		
	Proud [A]	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5		
	Teplota absolutní [°C]	86,3	89,3	92,4	95,6	99,1	103,1	107,1		
	Rezistivita [Ω.m]	0,06554	0,06629	0,06693	0,06763	0,06847	0,06933	0,07021		

Teplota 85 °C											
2,5 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	272	296	310	323	337	360	372			
	Proud [A]	18	19	20	20,5	21	21,5	22			
	Teplota absolutní [°C]	96	98,4	101,1	102,3	103,2	104	105			
	Rezistivita [Ω.m]	0,01511	0,01558	0,01550	0,01576	0,01605	0,01674	0,01691			
1,5 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	243	261	270	280	290					
	Proud [A]	14	15	15,5	16	16,5					
	Teplota absolutní [°C]	99,5	101,4	102,8	103,9	105,4					
	Rezistivita [Ω.m]	0,01736	0,01740	0,01742	0,01750	0,01758					
1 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	309	361	388	415	444					
	Proud [A]	12	13	14	14,5	15					
	Teplota absolutní [°C]	96,9	100,2	103,3	104,8	106,8					
	Rezistivita [Ω.m]	0,02575	0,02777	0,02771	0,02862	0,02960					
0,75 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	240	260	299	333	367	403	421	443	465	491
	Proud [A]	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
	Teplota absolutní [°C]	93	94,1	95,4	97,2	98,9	100,5	101,5	102,9	104,4	105,5
	Rezistivita [Ω.m]	0,02824	0,02889	0,03147	0,03330	0,03495	0,03664	0,03661	0,03692	0,0372	0,03777
0,5 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	405	431	457	484	510					
	Proud [A]	7	7,5	8	8,5	9					
	Teplota absolutní [°C]	98,1	100,4	102,6	105	107,6					
	Rezistivita [Ω.m]	0,05786	0,05747	0,05713	0,05694	0,05667					
0,35 mm <sup>2</sup>	Úbytek napětí [mV]	362	408	442	488	519					
	Proud [A]	5	5,5	6	6,5	7					
	Teplota absolutní [°C]	95,1	97,6	101,1	102,9	105,5					
	Rezistivita [Ω.m]	0,07240	0,07418	0,07367	0,07508	0,07414					

## Příloha B – citlivostní analýza varianty I. A II. (RCF) a kumulované DCF

Varianta I.																
	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>diskont</b>	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16
<b>anuita</b>	0,142456	0,145477	0,148528	0,15161	0,154722	0,161036	0,167468	0,174015	0,180674	0,187444	0,194321	0,201303	0,208387	0,21557	0,22285	0,230224
<b>6 m</b>	49,30	-49,76	-149,84	-250,92	-353,00	-560,11	-771,07	-985,81	-1204,25	-1426,29	-1651,86	-1880,86	-2113,21	-2348,82	-2587,61	-2829,48
<b>7 m</b>	836,28	737,22	637,14	536,05	433,98	226,87	15,91	-198,83	-417,27	-639,31	-864,88	-1093,88	-1326,23	-1561,85	-1800,63	-2042,50
<b>8 m</b>	1623,26	1524,20	1424,12	1323,03	1220,95	1013,85	802,89	588,15	369,71	147,67	-77,90	-306,90	-539,25	-774,87	-1013,65	-1255,53
<b>9 m</b>	2410,24	2311,17	2211,10	2110,01	2007,93	1800,83	1589,87	1375,12	1156,69	934,64	709,08	480,08	247,72	12,11	-226,67	-468,55

Varianta II.																
	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>diskont</b>	0,03	0,035	0,04	0,045	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16
<b>anuita</b>	0,142456	0,145477	0,148528	0,15161	0,154722	0,161036	0,167468	0,174015	0,180674	0,187444	0,194321	0,201303	0,208387	0,21557	0,22285	0,230224
<b>6 m</b>	-172,57	-271,63	-371,71	-472,80	-574,88	-781,98	-992,94	-1207,68	-1426,12	-1648,16	-1873,73	-2102,73	-2335,08	-2570,70	-2809,48	-3051,36
<b>7 m</b>	577,43	478,37	378,29	277,20	175,12	-31,98	-242,94	-457,68	-676,12	-898,16	-1123,73	-1352,73	-1585,08	-1820,70	-2059,48	-2301,36
<b>8 m</b>	1327,43	1228,37	1128,29	1027,20	925,12	718,02	507,06	292,32	73,88	-148,16	-373,73	-602,73	-835,08	-1070,70	-1309,48	-1551,36
<b>9 m</b>	2077,43	1978,37	1878,29	1777,20	1675,12	1468,02	1257,06	1042,32	823,88	601,84	376,27	147,27	-85,08	-320,70	-559,48	-801,36

Diskontovaná doba návratnosti investice									
roky	0	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>7 m</b>									
cashflow [€]	-32 800	5072	4901	4735	4575	4420	4271	4126	3987
kumulované DCF [€]	-32 800	-27728	-22827	-18091	-13516	-9096	-4825	-699	3288
cashflow [€]	-32 800	5797	5601	5412	5229	5052	4881	4716	4556
kumulované DCF [€]	-32 800	-27003	-21402	-15990	-10762	-5710	-829	3887	8444
cashflow [€]	-32 800	6522	6301	6088	5882	5683	5491	5305	5126
kumulované DCF [€]	-32 800	-26278	-19977	-13889	-8007	-2323	3168	8473	13599
cashflow [€]	-32 800	7 246	7 001	6 765	6 536	6 315	6 101	5 895	5 696
kumulované DCF [€]	-32 800	-25 554	-18 552	-11 788	-5 252	1 063	7 164	13 059	18 755