

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh speciálního autotransformátoru

Autor práce:

Bc. Jiří Voříšek

Vedoucí práce:

doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří VOŘÍŠEK**
Osobní číslo: **E21N0027K**
Studijní program: **N0714A060017 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Návrh speciálního autotransformátoru**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Popište princip autotransformátoru.
2. Navrhněte jednoúčelový autotransformátor pro použití v koncové svítilně motocyklu Jawa 555 vč. mechanické konstrukce.
3. Autotransformátor realizujte a proveďte na něm měření.
4. Graficky zpracujte naměřená data a učiňte závěry.




Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **min. 10**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**



Seznam doporučené literatury:

1. Skala, B.: Elektrické stroje II. studijní opora, ZČU 2021.

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

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**


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



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce pojednává o návrhu speciálního autotransformátoru pro ochranu žárovek ve světelném obvodu motocyklu Jawa 555. Jeho návrh spočívá ve vysvětlení principu činnosti autotransformátoru, vzniku magnetického toku v magnetickém obvodu a jeho využití pro převod autotransformátoru do pracovního režimu tlumivky.

Samotný návrh sestává z výpočtu elektrických parametrů a návrhu mechanické konstrukce jednotlivých komponentů. Při jejich návrhu byl kladen důraz na omezený zástavbový prostor a konečný vzhled. Značná část práce je zaměřena na popis fyzického zhotovení navrženého autotransformátoru a provedení měření pro ověření jeho činnosti.

Součástí měření bylo dílčí měření pro ověření charakteristik použitých světelných zdrojů. Hlavní část měření spočívala v nasimulování tří možných provozních stavů. Stav bez poruchy, porucha předního světlometu a porucha zadního světlometu. V bezporuchovém stavu byl ověřován režim práce autotransformátor, v poruchových stavech režim práce tlumivka. Bylo zjištěno, že díl v případě potřeby plynule a spolehlivě přechází mezi oběma provozními stavy. Výsledky měření byly graficky znázorněny za pomoci časových průběhů, závislostí na napájecím napětí a fázorovým diagramem.

V závěru práce je zhodnoceno, že použití vyrobeného dílu slouží jako vhodná ochrana, avšak výrobně poměrně složitá. Je taktéž navrženo, v jakých částech by bylo vhodné konstrukci změnit pro případ manuální výroby většího množství kusů.

Klíčová slova

Autotransformátor, Jawa 555, magnetický obvod, EI plechy, návrh autotransformátoru, magneto, navíjení, tlumivka, magnetický tok, napěťový úbytek, světelný obvod, ochrana žárovek

Abstract

The presented diploma thesis deals with the design of a special autotransformer for the protection of light bulbs in the lighting circuit of the Jawa 555 motorcycle. Its design consists in explaining the principle of operation of the autotransformer, the generation of magnetic flux in the magnetic circuit, and its use for converting the autotransformer into the working mode of the choke.

The design itself consisted of the calculation of electrical parameters and the design of the mechanical construction of individual components. During their design, emphasis was placed on the limited building space and the final appearance. A significant part of the work is focused on describing the physical construction of the proposed autotransformer and performing measurements to verify its operation.

Part of the measurement was a partial measurement to verify the characteristics of the used light sources. The main part of the measurement consisted in simulating three possible operating states. No fault condition, front headlight fault and rear headlight fault. In a fault-free state, the autotransformer operating mode was verified, in a faulted state, the choke operating mode was verified. The part was found to transition smoothly and reliably between both operating states when needed. The measurement results were graphically represented with the help of time courses, dependence on the supply voltage and a phasor diagram.

At the end of the work, the use of the manufactured part as a suitable protection is evaluated. However, production is quite complex. It is also proposed in which parts of the structure it would be appropriate to change in the case of manual production of a larger number of pieces.

Key Words

Autotransformer, Jawa 555, Magnetic Circuit, EI Sheets, Autotransformer Design, Magneto, Winding, Choke, Magnetic Flux, Voltage Drop, Light Circuit, Bulb Protection

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval za spolupráci, technickou podporu a konzultace během vzniku práce technikům ze společností Pikatron GmbH. a Transformatorenwerk Creuzburg, jmenovitě Dr. Ing. Felixi Henschkemu a Dipl. Ing. Andreasu Gläserovi.

Dále děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Bohumilu Skalovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Popis elektroinstalace motocyklů Jawa 550 a 555	- 3 -
1.1 Vývoj elektroinstalace	- 3 -
1.2 Popis tlumivky	- 5 -
2 Princip autotransformátoru	- 6 -
3 Návrh Autotransformátoru	- 8 -
3.1 Zadání	- 8 -
3.2 Výpočet reaktančního úbytku napětí	- 9 -
3.3 Zvolení magnetického obvodu – jádra.....	- 9 -
3.4 Výpočet kmitočtu.....	- 10 -
3.5 Výpočet indukovaného napětí a určení počtu závitů	- 11 -
3.6 Výpočet magnetického napětí.....	- 11 -
3.7 Výpočet průměrů vodičů	- 12 -
3.8 Výpočet proudové hustoty	- 13 -
3.9 Výpočet magnetického toku	- 13 -
3.10 Výpočet reaktancí.....	- 13 -
3.11 Výpočet indukčností.....	- 13 -
4 Návrh mechanické konstrukce.....	- 14 -
4.1 Kostra.....	- 14 -
4.2 Třmen a svorkovnice	- 14 -
4.3 Použité izolační materiály.....	- 16 -
5 Výroba autotransformátoru.....	- 17 -
5.1 Výroba navíjecího trnu	- 17 -
5.2 Popis a programování strojní navíječky TPC ERN 22	- 18 -
5.3 Popis navíjení.....	- 20 -
5.4 Impregnace vinutí	- 27 -
5.5 Montáž jádra	- 30 -
5.6 Montáž třmenu a dokončení tlumivky	- 33 -
6 Měření vlastností	- 35 -
6.1 Měření žárovek	- 35 -

6.2	Ověření funkce ATr	- 37 -
6.2.1	Zatížení zadním světlem 6 V / 5 W	- 39 -
6.2.2	Zatížení předním světlem 6 V / 15 W	- 42 -
6.2.3	Zatížení zadním světlem 6 V / 5 W a současně předním 6 V / 15 W	- 45 -
6.3	Měření parametrů ATr	- 48 -
6.4	Fázorový diagram	- 50 -
6.4.1	Bezporuchový stav – režim autotransformátor	- 50 -
6.4.2	Stav s poruchou – režim tlumivka	- 50 -
	Závěr	I
	Literatura	III

Seznam symbolů a zkratek

U	V	<i>elektrické napětí</i>
I	A	<i>elektrický proud</i>
S	VA	<i>zdánlivý výkon</i>
S_p	VA	<i>průchozí zdánlivý výkon</i>
S_T	VA	<i>zdánlivý (typový) výkon přenášený transformační vazbou</i>
S_G	VA	<i>zdánlivý výkon přenášený galvanickou vazbou</i>
k	-	<i>převod transformátoru</i>
U_i	V	<i>indukované napětí</i>
U_x	V	<i>reaktanční úbytek napětí</i>
L	H	<i>indukčnost</i>
f	Hz	<i>frekvence</i>
P	W	<i>činný výkon</i>
R	Ω	<i>elektrický odpor</i>
X	Ω	<i>reaktance</i>
J	A/m^2	<i>proudová hustota</i>
T	$^{\circ}C$	<i>teplota</i>
n	<i>ot/min</i>	<i>otáčky motoru</i>
ϕ	Wb	<i>magnetický indukční tok</i>
U_m	A	<i>magnetické napětí</i>
B	T	<i>magnetická indukce</i>
N	-	<i>počet závitů</i>
Q	-	<i>činitel jakosti</i>
p	-	<i>pólové dvojice – pól páry</i>
S_{Fe}	m^2	<i>plocha středního sloupku magnetického obvodu</i>
S_{Cu}	m^2	<i>průřez měděného vodiče</i>
S_{okno}	m^2	<i>plocha pro zástavbu cívky do magnetického obvodu</i>
$S_{vinutí}$	m^2	<i>plocha vinutí</i>
$S_{plnění}$	m^2	<i>plocha vinutí v navijecí komoře</i>
d	m	<i>průměr měděného vodiče</i>
p_n	$mbar$	<i>atmosférický tlak</i>
α	K^{-1}	<i>teplotní součinitel odporu</i>
φ	$^{\circ}$	<i>fázový posuv</i>

ATr	Autotransformátor
PE	Polyetylen
PUR	Polyuretan
PETG	Polyethylen terephthalat glycol
FDM	Fused Deposition Modeling – Výroba taveným vláknem
VPI	Vakuum press impregnation – Vakuově tlaková impregnace

Úvod

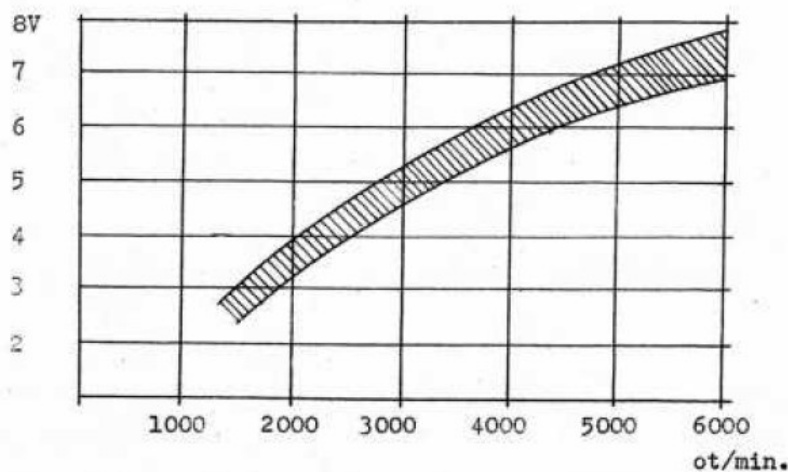
Dnes již historický motocykl Jawa 555, který se dostal do prodeje v roce 1958, byl inovací oblíbeného malého lehkého motocyklu Jawa 550. Od předchozího modelu se liší především zvýšením výkonu motoru z 1,6 na 2,2 koňské síly, přepracováním odpružení zadního kola a brzdového ústrojí, rozšířením kapotáže, doplněním tachometru a modernizací elektroinstalace. Motocykl byl v prodeji do roku 1962 a dle dobových materiálů bylo vyrobeno 327 320 kusů. Nadcházející text je pojednáním o odstranění nespolehlivosti elektroinstalace obou typů motocyklu v oblasti světelného obvodu. Ke zlepšení spolehlivosti bylo přistoupeno citlivě s ohledem na dobovou techniku bez použití moderních elektronických řešení, která by však mohla být řešením dokonce vhodnějším. Při návrhu byl brán zřetel na omezený zástavbový prostor v kapotáži motocyklu a obsluhu autotransformátoru během jízdy. Nemožnost autotransformátor regulovat předurčila, že řešením je návrh a výroba speciálního autotransformátoru s pevnou odbočkou. Ten je navržen jako ochranný prvek ve světelném obvodu. Vhodnost použití je pro Jawu 550 i 555 zcela totožná, neboť jsou si elektroinstalace v oblasti světelného okruhu u obou typů motocyklu velice podobné. Největším rozdílem obou typů je přítomnost tlumivky u typu Jawa 555, která zásadním způsobem zvyšuje spolehlivost elektroinstalace oproti předchozímu modelu. Cílem je nahradit právě tlumivku navrhovaným autotransformátorem, neboť ta je již jako náhradní díl absolutně nedostupná, což značně ztěžuje těm, kteří se rozhodnou tyto motocykly renovovat, jejich práci.

Elektroinstalace obou motocyklů byla zhotovována za pomoci vodičů o průřezu 1 mm^2 s barevně odlišenou izolací. Jeden z rozdílů Jawy 555 oproti Jawě 550 spočívá ve vylepšeném 6 V magnetu o výkonu 20 W , které bylo vyvinuto v Považských strojárnách konstruktéry Ing. Logauerem a Ing. Vaculkou. Magneto je označení pro alternátor s permanentními magnety zalitými v hliníkovém rotoru. Rotor pro Jawu 555 byl modifikovaný pro použití nemagnetického materiálu AlNi a je upevněn na klikovém hřídeli spolu s vačkou přerušovače. Stator byl upravený tak, aby se zvýšila indukčnost vinutí a aby chránil rotor před samovolným demagnetováním. Stator je tvořen čtyřmi cívkami pro zapalovací okruh a čtyřmi cívkami pro světelný okruh. Cívky pro zapalovací okruh jsou vyvedeny na svorku magnetu číslo 11 a cívky světelného okruhu na svorku 55. [1]

Nectností původní elektroinstalace Jawy 550 a strojů typu 555 z rané fáze výroby je přepalování vlákna zadní 5 W žárovky. K tomu docházelo především kvůli závadě přepínače dálkového

a potkávacího světla [2]. Důsledkem jeho poruchy bylo zaseknutí ovládací páčky, a tedy nedostatečná rychlost přepnutí vláken žárovky hlavního světlometu ($15\text{ W}/15\text{ W}$) a následné přetížení zadní žárovky. Příčinou přetížení 5 W žárovky mohl být taktéž přerušovaný vodič kdekoli ve světelném okruhu, především však vodič od spínací skříňky k přednímu světlometu. Z tohoto důvodu byly motocykly Jawa 555 od roku 1958 vybavovány tlumivkou umístěnou v krytu předního světlometu, jakožto ochranným prvkem.

Z konstrukce čtyřpólového magnetu plyne, že proud do světelného okruhu není nijak řízen a je rozložen mezi přední a zadní světlo pouze výkonem žárovek. Magneto zatížené jmenovitými 20 W má napěťový rozsah 6 V při 4000 ot/min až 8 V při 6000 ot/min [2]. Rozsah napětí je zachycen na obrázku 1, pocházejícím ze servisní příručky. Za předpokladu motocyklu nevybaveného tlumivkou dochází při poruše přepínače dálkového a potkávacího světla ke krátkodobému odpojení přední žárovky. Během toho teče veškerý výkon pouze do zadní žárovky, která na toto zatížení není dimenzována. Obzvláště kritická situace v tomto případě nastává při vyšších otáčkách motoru nad 4000 ot/min . Při odpojení přední žárovky dojde v palubní síti k přepětí ($16\text{--}20\text{ V}$), které vlákno zadní žárovky nevydrží a přepálí se [2]. Nedlouho po něm se přepálí i vlákno žárovky v předním světlometu. Absence zadní žárovky v elektroinstalaci motocyklu totiž také vede k přepětí ($10\text{--}12\text{ V}$), které vlákno přední žárovky nevydrží. Proto je bezpodmínečně nutné, aby byly zapojeny vždy obě žárovky současně.



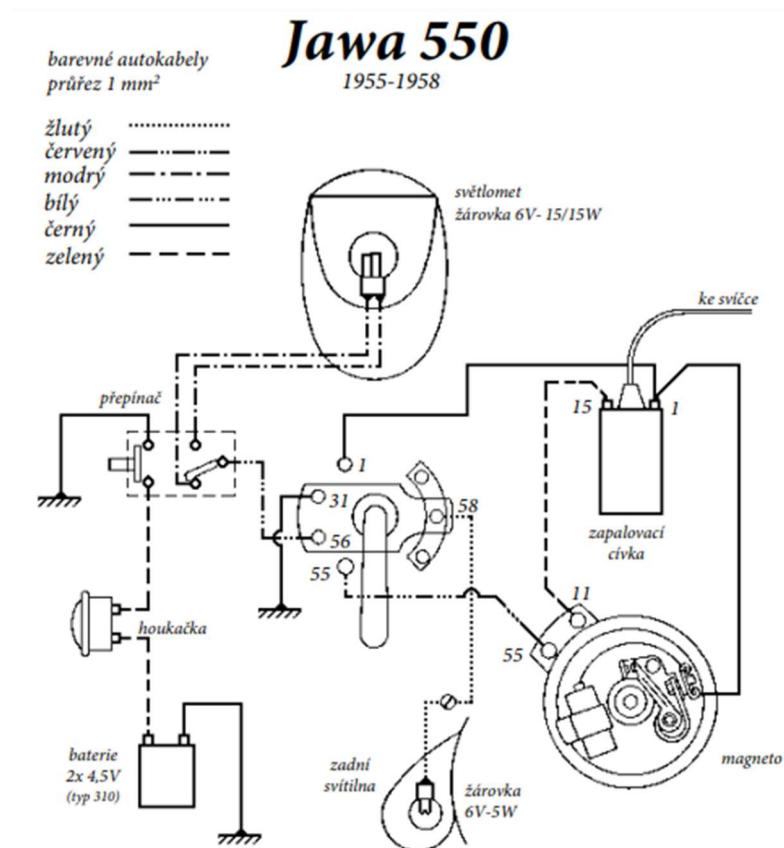
Obrázek 1 – Závislost napětí na otáčkách při zatížení 20 W [2]

Pozdější modely lehkých motocyklů (Jawa 05, 20 a 21) měly již magneto konstruované tak, že měly instalovány tři nezávislé a vyměnitelné satorové cívky. Jedna cívka byla pro zapalování, druhá pro přední světlo a třetí cívka pro světlo zadní. Tím byl tento neduh definitivně odstraněn a tlumivka pozbyla významu a u těchto motocyklů již nebyla montována.

1 Popis elektroinstalace motocyklů Jawa 550 a 555

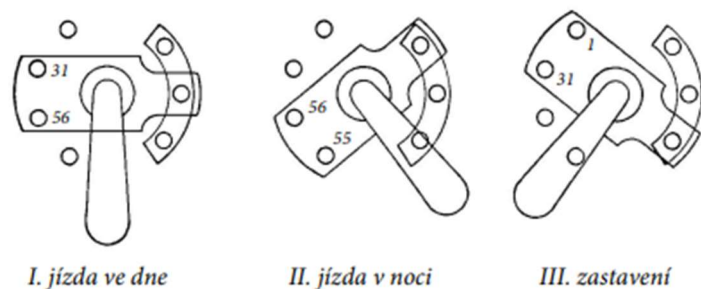
1.1 Vývoj elektroinstalace

Na *obrázku 2* je znázorněna původní elektroinstalace motocyklů Jawa 550 a raných motocyklů 555 [1]. Následující popis je zaměřen pouze na světelný okruh. Je patrné, že ze svorky magenta číslo 55 je elektrický proud veden do spínací skříňky, rovněž na svorku 55. Spínací skříňkou je volen režim jízdy ve dne (dle tehdejší legislativy s vypnutými světly), jízdu v noci a zastavení motoru. Pozice spínací skříňky pro volbu jízdního režimu jsou znázorněny na *obrázku 3*. Na *obrázku 2* [3] je znázorněna jízda ve dne.



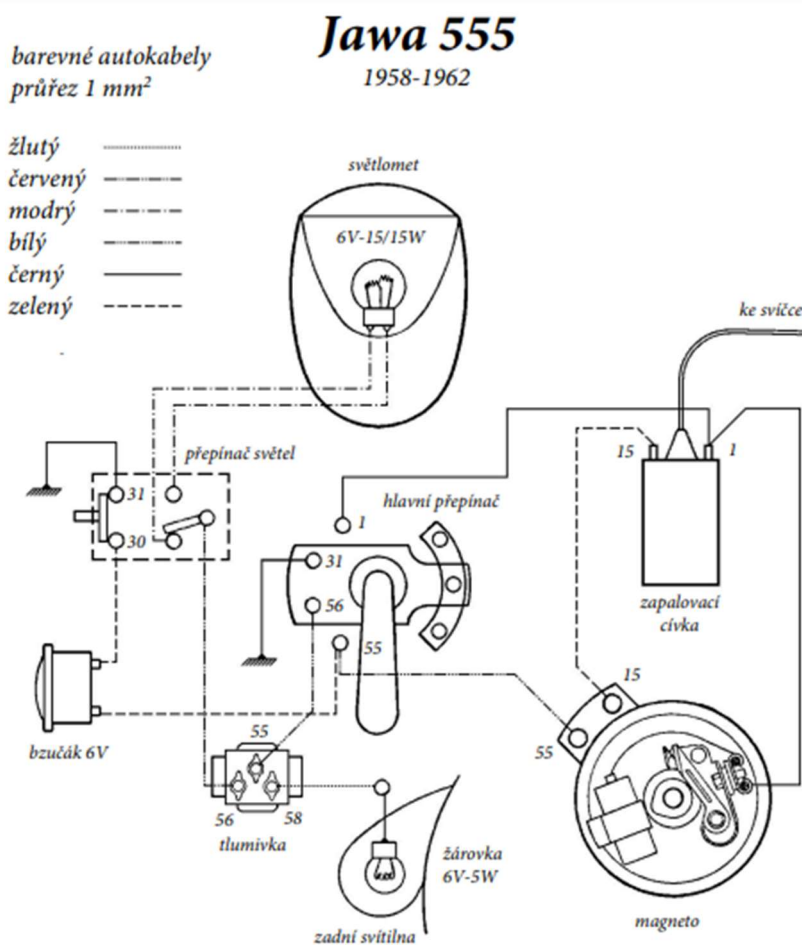
Obrázek 2 – Schéma zapojení Jawy 550 [3]

Ze schématu je dále patrné, že svorka 58 spínací skříňky je přivedena na zadní světlo a zůstává ve všech třech pozicích ovládací páčky v nezměněném stavu. Na svorku 56 je přivedeno přední světlo, které je přepínačem ovlivňováno. Podobně je tomu u svorky 31, která je přivedena na kostru stroje. Jak vidno, při jízdě ve dne jsou voličem propojené svorky 56 a 58 ukostřeny skrze otočný volič svorkou 31. Pro zastavení stroje je propojena svorka 58, 31 a 1, na kterou je přiveden vodič z indukční cívky zapalovacího okruhu. Pro jízdu v noci je skrze volič přiváděn proud z magneta svorkou 55 na svorky 56 a 58.



Obrázek 3 – Polohy spínací skříňky [3]

Jednou z modifikací elektroinstalace bylo v roce 1958 nahrazení 4 V houkačky 6 V bzučákem a tím i odstranění přítomnosti jakékoliv baterie v motocyklu. Hlavním rozdílem je ale především úprava světelného okruhu motocyklu. Přibyla již v úvodu zmíněná tlumivka, která měla za úkol chránit žárovky proti přepětí a tím zvětšit spolehlivost celé elektroinstalace motocyklu. Schéma zapojení z obrázku 4 [3] ukazuje, že střed tlumivky uvedený pod číslem 55 je připojen na svorku 56 na spínací skřínce místo předního světlometu. Zadní i přední světlomet jsou nově připojeny na svorky 56 a 58 na přidané tlumivce.



Obrázek 4 – Schéma zapojení Jawy 555 [3]

1.2 Popis tlumivky

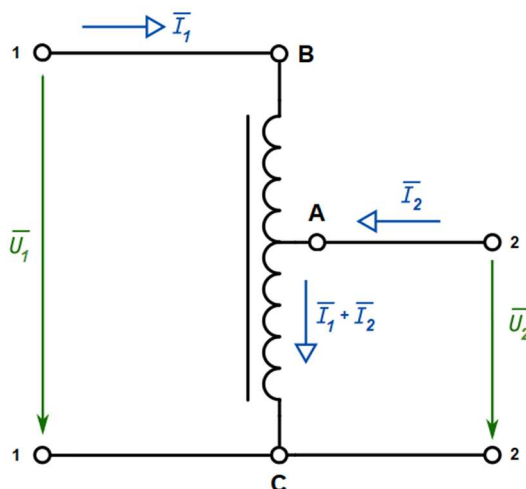
V dnešních dnech je tato tlumivka takřka nesehnatelným náhradním dílem. Z tohoto důvodu nastává problém při renovacích předmětných motocyklů. Řešení je možno nalézt v dílenské příručce vydané v roce 1959 [2]. V této publikaci je navržena modifikace zapojení světelného okruhu, kdy je zadní žárovka zcela odizolována od kostry stroje. Následně je tato žárovka připojena paralelně mezi dálkové a potkávací vlákno hlavního světlometu. V publikaci se nachází též krátký popis ochranné tlumivky, ze kterého vyplývá mimo jiné její velikost.

Tlumivka je tvořena dvěma vinutími, která jsou navinuta proti sobě na společném jádře. Na svorku s číslem 56 je připojen začátek prvního vinutí. Jeho konec je vyveden na svorce 55. Na tuto svorku je taktéž připojen začátek druhého vinutí, přičemž jsou vinutí vzájemně propojena. Jeho konec je vyveden na svorku 58. První vinutí je tvořeno 43 závitů měděného vodiče průměru $0,75\text{ mm}$. Druhé vinutí je tvořeno 125 závitů měděného vodiče o průměru $0,4\text{ mm}$. Jádro je složeno z transformátorových plechů E 12 a I 12 [2].

2 Princip autotransformátoru

Autotransformátor (dále též jako ATr) je označení pro elektrický stroj používaný k transformaci nebo regulaci střídavého napětí. Jeho základní rozdíl oproti standardnímu transformátoru spočívá v tom, že má jen jedno vinutí, respektive primární a sekundární vinutí jsou galvanicky spojena. Snižovací autotransformátor je konstruován tak, že je z jeho jednoho primárního vinutí pro vyšší napětí vyvedena odbočka, která tvoří sekundární vinutí pro nižší napětí. Sekundární vinutí pro nižší napětí je tedy tvořeno pouze částí primárního vinutí. Díky tomu je možno ušetřit značné množství materiálu v porovnání s dvouvinutíovým transformátorem.

Schéma jednoduchého snižovacího autotransformátoru s jednou pevnou odbočkou je znázorněno na *obrázku 5*. Svorky 1-1 primární strany jsou připojeny na konce vinutí v bodech B a C. Sekundární strana se svorkami 2-2 je tvořena jedním koncem vinutí C primární strany a vývodem z odbočky vinutí, která je značena jako bod A. Vinutí mezi body A a B je vinutí označované jako sériové, mezi body B a C jako paralelní. Sériovým vinutím prochází proud I_1 a paralelním vinutím proud $I_1 + I_2$.



Obrázek 5 - Schéma jednofázového snižovacího autotransformátoru

Odboček může být i více, pokud je autotransformátor konstruován jako regulační. Případně může být odbočka tvořena posuvným jezdcem a díky tomu lze regulovat napětí sekundární strany plynule. V případě většího počtu pevných odboček s přepínačem odboček je napětí regulováno skokem.

Hlavní nevýhodou autotransformátoru je galvanické propojení primární a sekundární strany. Z toho důvodu se autotransformátor nesmí používat jako bezpečnostní oddělovací transformátor [4]. Výhodou autotransformátoru však je, že při porovnání s dvouvinutíovým transformátorem stejného výkonu je ATr menší, lehčí a díky tomu i levnější. Toho je hojně využíváno například v trakčních lokomotivách [5].

Bude-li na autotransformátor nahlíženo z hlediska zdánlivých výkonů, tak je nutno konstatovat, že výkon vstupující do ATr se při zanedbání ztrát musí rovnat výkonu vystupujícímu. Takový výkon lze označovat jako jmenovitý, případně průchozí – S_P [6].

$$S_P = U_1 * I_1 = U_2 * I_2 \quad (2.1)$$

Přenos výkonu z primární na sekundární stranu probíhá jednak transformační vazbou, jako je tomu u dvouvinutového transformátoru, tak i vazbou galvanickou. Výkon přenášený transformační vazbou ze vstupu na výstup je dán vztahem 2.2.

$$S_T = I_1 * (U_1 - U_2) \quad (2.2)$$

Kde rozdíl napětí $U_1 - U_2$ odpovídá napětí na sériovém vinutí. Výkon přenášený galvanicky bude dán rozdílem výkonu průchozího a transformačního.

$$S_G = S_P - S_T \quad (2.3)$$

Poměr mezi transformačně a galvanicky přeneseným výkonem je dán převodem autotransformátoru. Ten je určen poměrem počtu závitů dle následujícího vztahu, kde N_{ser} je počet závitů sériového vinutí a N_{par} počet závitů paralelního vinutí.

$$k = \frac{N_{ser} + N_{par}}{N_{par}} \quad (2.4)$$

Z toho vyplývá, že pokud by splynuly body A a B v jeden (nenacházelo by se v autotransformátoru sériové vinutí) byl převod $k = 1$. Tudíž by veškerý výkon přecházel na sekundární stranu pouze galvanicky. Transformovaný výkon by byl tedy nulový. Čím více závitů bude sériové vinutí mít, tím větší bude převod.

Pokud by byla hledána mez, do které je vhodné použít autotransformátor místo klasického transformátoru je třeba uvažovat poměr transformovaného (typového) výkonu S_T a průchozího výkonu S_P . Čím bude průchozí výkon větší při co nejmenším typovém výkonu, tím bude větší úspora a ATr výhodnější. Z toho plyne, že největších úspor je dosahováno, pokud je transformační poměr blízký jedné.

$$\frac{S_T}{S_P} = \frac{U_1 - U_2}{U_1} = \frac{I_2 - I_1}{I_2} \quad (2.5)$$

Autotransformátory se využívají maximálně do převodu $k = 4$. Při větších převodech je již vhodnější použít klasický transformátor stejného výkonu.

Z fyzikálního hlediska vybudí vstupní proud I_1 v magnetickém obvodu časově proměnný magnetický tok Φ_1 , který indukuje v paralelním vinutí indukované napětí U_{i1} . Toto napětí má za následek vznik proudu a vznik druhého toku Φ_2 . Toky Φ_1 a Φ_2 jsou shodně orientovány. Díky výslednému toku Φ daného součtem Φ_1 a Φ_2 je možný vznik transformátorové vazby v ATr.

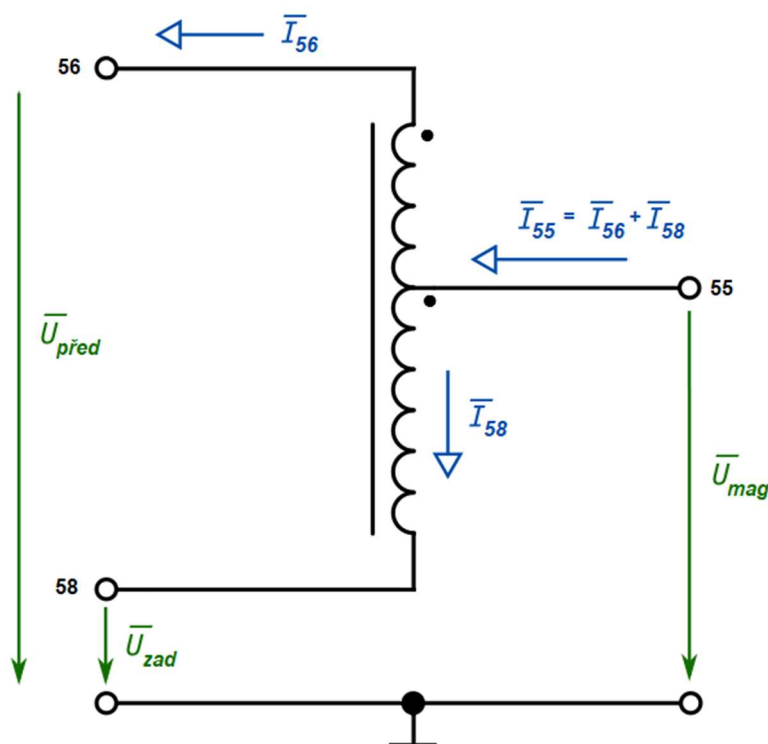
3 Návrh Autotransformátoru

3.1 Zadání

Z popisu vzniku a velikosti přepětí v palubní síti plyne, že při poruše jedné ze žárovek se zvýší napětí světelného okruhu magneta a na zbylých připojených spotřebičích vzroste napětí na nepřipustně vysokou hodnotu. Bzučák toto přepětí snáší. Kritický je však tento stav pro druhou žárovku. Proto je potřeba automaticky zařadit ke zbylé žárovce prvek s úbytkem napětí vhodné velikosti. S výhodou lze použít vinutý díl, který může přecházet mezi pracovními režimy autotransformátor a tlumivka. Zapalovací cívka motocyklu je před přepětím ochráněna oddělenými napájecími cívkami uvnitř magneta.

Návrh tohoto vinutého dílu je založen na práci s magnetickými napětími U_m a toky Φ . Vinutí je rozděleno na dvě části s různým počtem závitů. Počet závitů je dán proudem procházejícím žárovkami. Magnetická napětí musejí být přibližně stejná, ale opačně orientovaná. Díky tomu bude díl pracovat v pracovním režimu autotransformátoru. Veškerý přenášený výkon bude galvanickou vazbou. Úbytek napětí je pak přibližně 0,65 V.

Pokud jedna ze žárovek přestane svítit, zbylý magnetický tok Φ způsobí vznik podstatně vyššího reaktančního napětí, které kompenzuje nárůst napětí magneta s nižším zatížením. Tím je zajištěno, že díl přejde do pracovního režimu tlumivky.



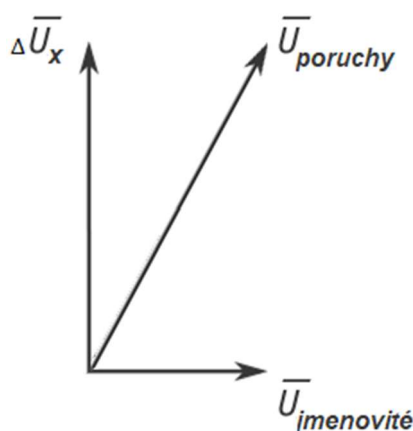
Obrázek 6 - Schéma zapojení speciálního ATr

3.2 Výpočet reaktančního úbytku napětí

Ze servisní příručky [2] plyne, že při zapojení samotné žárovky 6 V/15 W činí při jmenovitých otáčkách motoru $n = 4000 \text{ ot/min}$ napětí ve světelném okruhu 10–12 V a též skutečnost, že při použití samotné žárovky 6 V/5 W činí napětí 16–20 V. Z toho lze odhadnout, že pro správnou ochrannou funkci v případě poruchy jedné ze žárovek je požadovaný reaktanční úbytek $\Delta U_{x1} = 8 \text{ V}$ pro 15 W žárovku a $\Delta U_{x2} = 19 \text{ V}$ pro 5 W žárovku. Pro výpočet reaktančního úbytku napětí je vyžit následující vztah.

$$\Delta U_x = \sqrt{U_{poruchy}^2 - U_{jmenovité}^2} \quad (3.1)$$

Ten vychází z vektorového součtu napětí.



Obrázek 7 – Vektorový součet napětí

a) Pro 15 W žárovku

$$\Delta U_{x1} = \sqrt{10^2 - 6^2} = 8 \text{ V} \quad (3.2)$$

b) Pro 5 W žárovku

$$\Delta U_{x2} = \sqrt{20^2 - 6^2} \cong 19 \text{ V} \quad (3.3)$$

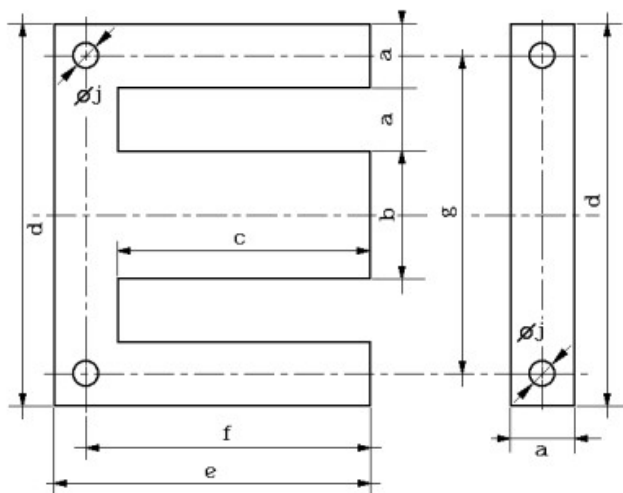
3.3 Zvolení magnetického obvodu – jádra

Jak již bylo dříve zmíněno, jádro původní tlumivky je tvořeno plechy EI 12. S ohledem na zástavbový prostor v kapotáži motocyklu byla hledána vhodná alternativa odpovídajících či přibližně stejných rozměrů. Je obecně známo, že rozměry EI plechů jsou standardizovány. Číselné označení má přímou spojitost s šířkou středního sloupku E jádra. Na obrázku 8 je tento rozměr kótován b . Zbylé rozměry jsou uvedeny v tabulce 1. Z přiložených rozměrů vyplývá, že vnější rozměry E plechu jsou $38 \times 25,5 \text{ mm}$. Plech I má velikost $6,5 \times 38 \text{ mm}$. Z toho plyne výsledná velikost magnetického obvodu s plechy EI 12 je $38 \times 32 \text{ mm}$. Z tohoto důvodu byly pro návrh autotransformátoru zvoleny jako nejvhodnější a nejdostupnější

transformátorové plechy od firmy Waasner katalogového čísla 10.010 s označením EI 38 [7], které svými rozměry však s plechy EI 12 zcela nesedí. I přes označení výrobce „EI 38“ by podle výkresu z katalogu [7] odpovídaly plechům EI 12,8. Vnější rozměr magnetického obvodu při použití plechů Waasner EI 38 bude $38,4 \times 32 \text{ mm}$, což je pro zástavbu do kapotáže naprosto vyhovující. Tloušťka plechu je $0,5 \text{ mm}$ a $B_{max} = 1,3 \text{ T}$ [7].

Tabulka 1: Příklad rozměrů EI plechů [8]

Typ plechu	a	b	c	d	e	f	g	j
E 10	5	10	15	30	20	-	-	-
E 12	6,5	12	19	38	25,5	-	-	-
E 16	8	16	24	48	32	-	-	-



Obrázek 8 – Výkres transformátorových plechů [8]

3.4 Výpočet kmitočtu

Z konstrukce magneta se čtyřmi cívkami pro světelný okruh vyplývá, že je 4 pólové. Má tedy dva pól páry $p = 2$. Této skutečnosti je využito pro výpočet frekvence napětí v obvodu při jmenovitých otáčkách motoru $n = 4000 \text{ ot/min}$.

$$f = \frac{p * n}{60} = \frac{2 * 4000}{60} = 133,3 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

Ze závislosti napětí na otáčkách magneta na obrázku 1 plyne, že jmenovitého napětí 6 V je dosahováno při otáčkách vyšších nežli jmenovitých. Pro další výpočty byly proto zvoleny otáčky motoru $n = 4140 \text{ ot/min}$.

$$f = \frac{p * n}{60} = \frac{2 * 4140}{60} = 138 \text{ Hz} \quad (3.5)$$

3.5 Výpočet indukovaného napětí a určení počtu závitů

Pro vznik reaktančního úbytku napětí U_x správné velikosti je třeba vypočítat indukované napětí U_i . Indukované napětí je vypočteno z následujícího vztahu:

$$U_i = 4,44 * B * N * S_{Fe} * f \quad (3.6)$$

kde je indukované napětí U_i rovno požadovanému reaktančnímu úbytku U_x . Po úpravě:

$$U_i = U_x \quad (3.7)$$

$$U_x = 4,44 * B * N * S_{Fe} * f \quad (3.8)$$

kde je S_{Fe} plocha středního sloupku jádra. Uvažována je výška paketu je 16 mm .

$$S_{Fe} = 12,8 * 16 = 204,8 \text{ mm}^2 \cong 0,000205 \text{ m}^2 \quad (3.9)$$

Po úpravě vztahu pro výpočet indukovaného napětí je možno vypočítat počty závitů jednotlivých vinutí. Ty jsou vypočteny dle vztahu 3.10.

$$N = \frac{U_x}{4,44 * B * S_{Fe} * f} \quad (3.10)$$

$$N_1 = \frac{8}{4,44 * 1,3 * 0,000205 * 138} = 49 \text{ závitů} \quad (3.11)$$

$$N_2 = \frac{19}{4,44 * 1,3 * 0,000205 * 138} = 116 \text{ závitů} \quad (3.12)$$

3.6 Výpočet magnetického napětí

Pro další výpočty je nutno znát proudy tekoucí do žárovek. Ty je možno určit ze vztahu pro výpočet činného výkonu.

$$I = \frac{P}{U} \quad (3.13)$$

Kde I je proud tekoucí žárovkou při jejím jmenovitém napětí U a P je jmenovitý výkon žárovky. Proudů žárovkami vychází na $2,5 \text{ A}$ pro přední žárovku a $0,83 \text{ A}$ pro zadní žárovku.

$$I_{56} = \frac{15W}{6V} = 2,5 \text{ A} \quad (3.14)$$

$$I_{58} = \frac{5W}{6V} = 0,83 \text{ A} \quad (3.15)$$

Díky znalosti obou proudů je možno přistoupit k výpočtu magnetických napětí dle vztahu 3.16.

$$U_m = N * I \quad (3.16)$$

$$U_{m1} = N_1 * I_{56} = 49 * 2,5 = 122,5 \text{ A} \quad (3.17)$$

$$U_{m2} = N_2 * I_{58} = 116 * 0,83 = 96,3 \text{ A} \quad (3.18)$$

Pro pracovní režim autotransformátor je potřeba mít stejná magnetická napětí pro obě vinutí. Důležité je to také z důvodu, aby se jádro nepřesycovalo. Proto jsou U_m zprůměrovány.

$$U_m = \frac{U_{m1} + U_{m2}}{2} = \frac{122,5 + 96,3}{2} = 109,4 \text{ A} \quad (3.19)$$

Neboť jsou proudy dány žárovkami, je nutno zpětně upravit počty závitů jednotlivých vinutí. Díky tomu budou odpovídat velikosti magnetických napětí zprůměrované hodnotě.

$$N_1 = \frac{U_m}{I_{56}} = \frac{109,4}{2,5} = 43 \text{ závitů} \quad (3.20)$$

$$N_2 = \frac{U_m}{I_{58}} = \frac{109,4}{0,83} = 132 \text{ závitů} \quad (3.21)$$

3.7 Výpočet průměrů vodičů

Po zpětné úpravě počtu závitů vytváří obě vinutí stejná magnetická napětí. Proto musí v okně magnetického obvodu zabírat přibližně stejný prostor. U malých magnetických obvodů zabere podstatnou část okna kostra cívky a izolace. Protože musí být ponechán prostor na kostru s izolacemi, bude pro vinutí s plněním 0,75 k dispozici asi jen 40 % plochy okna. Z toho vychází přibližně 20 % plochy okna pro každé z vinutí. Plocha okna magnetického obvodu je dána délkou sloupků E plechu, činicí 19,2 mm, a vzdáleností krajního a středového sloupku, rovnou 6,4 mm.

$$S_{okno} = 19,2 * 6,4 = 122,88 \text{ mm}^2 \quad (3.22)$$

Plocha pro jedno vinutí vychází na 24,576 mm².

$$S_{vinutí} = S_{okno} * 0,2 \quad (3.23)$$

$$S_{vinutí} = 122,88 * 0,2 = 24,576 \text{ mm}^2 \quad (3.24)$$

Plocha pro lakovaný vodič při uvažování plnění prostoru navíjecí komory.

$$S_{plnění} = S_{vinutí} * 0,75 \quad (3.25)$$

$$S_{plnění} = 24,576 * 0,75 = 18,432 \text{ mm}^2 \quad (3.26)$$

Z této plochy lze vydělením počtem závitů N vypočítat průřez jednoho vodiče S_{Cu} .

$$S_{Cu1} = \frac{S_{plnění}}{N_1} = \frac{18,432}{43} = 0,429 \text{ mm}^2 \quad (3.27)$$

$$S_{Cu2} = \frac{S_{plnění}}{N_2} = \frac{18,432}{132} = 0,140 \text{ mm}^2 \quad (3.28)$$

Při uvažování kruhového průřezu byl vypočítán průměr jednoho vodiče.

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 * S_{Cu1}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0,429}{\pi}} = 0,74 \text{ mm} \quad (3.29)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 * S_{Cu2}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * 0,140}{\pi}} = 0,42 \text{ mm} \quad (3.30)$$

Vypočtené průměry drátu nemusejí zcela ideálně odpovídat dostupným průměrům. Proto byly zvoleny průměry vodiče $0,75 \text{ mm}$ a $0,4 \text{ mm}$, které jsou nejbližší vypočtenému průměru.

3.8 Výpočet proudové hustoty

Pro ověření vhodného dimenzování vodičů je vhodné vypočítat proudovou hustotu J .

$$J_1 = \frac{I_{56}}{S_{Cu1}} = \frac{2,5}{\frac{\pi * d_1^2}{4}} = \frac{10}{\pi * 0,75^2} = 5,6 \text{ A/mm}^2 \quad (3.31)$$

$$J_2 = \frac{I_{58}}{S_{Cu2}} = \frac{0,83}{\frac{\pi * d_2^2}{4}} = \frac{4 * 0,83}{\pi * 0,4^2} = 4,4 \text{ A/mm}^2 \quad (3.32)$$

3.9 Výpočet magnetického toku

Magnetický tok Φ ve středním sloupku lze vypočítat rozměrů a materiálu.

$$\Phi = B * S_{Fe} = 1,3 * 0,000205 = 267 \text{ } \mu\text{Wb} \quad (3.33)$$

3.10 Výpočet reaktancí

Ze znalosti reaktančních úbytků napětí a procházejících proudů lze stanovit reaktance jednotlivých vinutí následně.

$$X_1 = \frac{U_{x1}}{I_{56}} = \frac{8}{2,5} = 3,2 \text{ } \Omega \quad (3.34)$$

$$X_2 = \frac{U_{x2}}{I_{58}} = \frac{19}{0,83} = 22,9 \text{ } \Omega \quad (3.35)$$

3.11 Výpočet indukčností

Z reaktance vinutí lze vypočítat taktéž jednotlivé indukčnosti vinutí L .

$$L_1 = \frac{X_1}{2\pi * f} = \frac{3,2}{2\pi * 138} = 3,69 \text{ mH} \quad (3.36)$$

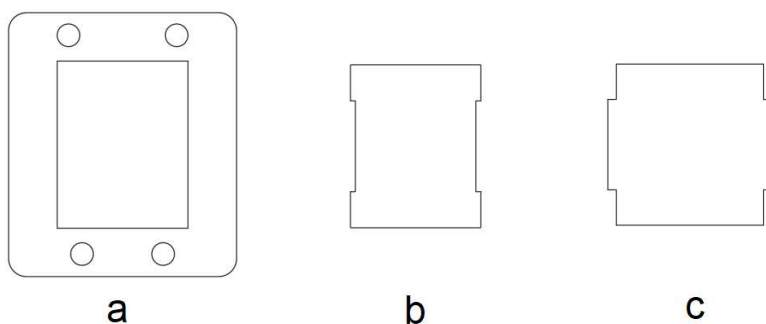
$$L_2 = \frac{X_2}{2\pi * f} = \frac{22,9}{2\pi * 138} = 26,4 \text{ mH} \quad (3.37)$$

4 Návrh mechanické konstrukce

4.1 Kostra

S ohledem k rozměrům transformátorových plechů Waasner a zvolenou výšku paketu 16 mm bylo přistoupeno k návrhu vlastní skládané kostry. Pro její výrobu byl zvolen pertinax o síle 1 mm a $0,5\text{ mm}$. Vhodnou alternativou k pertinaxu může být sklolaminátová deska.

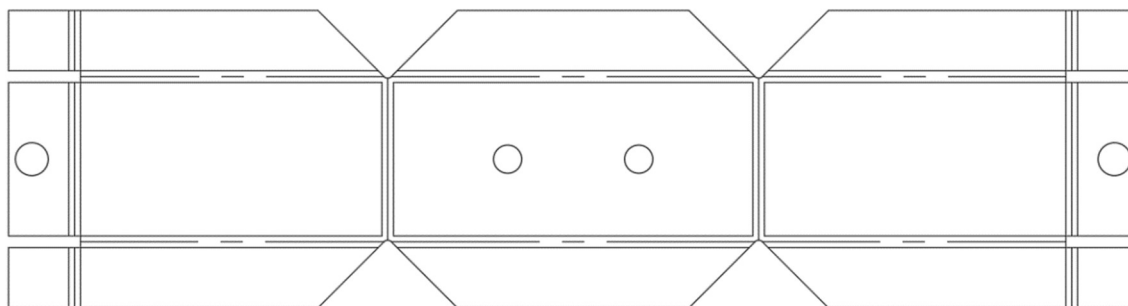
Navrženy byly 3 druhy přířezů. A to čela navíjecí komory, horizontální a vertikální bočnice. Bočnice jsou vůči sobě aretovány za pomoci výřezových klíčů. Velikost výřezových klíčů se řídí tloušťkou desky. Pro čelo a horizontální bočnice byla zvolena síla 1 mm . Pro bočnice vertikální pak $0,5\text{ mm}$. Tvary jednotlivých přířezů jsou znázorněny na *obrázku 9*. Čelo je označeno písmenem *a*, bočnice horizontální *b* a bočnice vertikální *c*. Čela navíjecích komor jsou na vzniklý tubus lepena kyanoakrylátovým lepidlem. Při návrhu byla k výšce paketu připočtena minimální nutná rezerva pro následnou montáž magnetického obvodu.



Obrázek 9 – Přířezy skládané kostry

4.2 Třmen a svorkovnice

Vzniklý magnetický obvod je třeba fixovat a následně přichytit ke kapotáži motocyklu. Z toho důvodu byl navržen ocelový třmen, k jehož vrchní straně je přinýtována svorkovnice. Ocel tloušťky $0,5\text{ mm}$ byla nařezána laserem dle výkresu z *obrázku 10*. Vzniklý výpalek byl poté natvarován to tvaru znázorněném na *obrázku 11*.

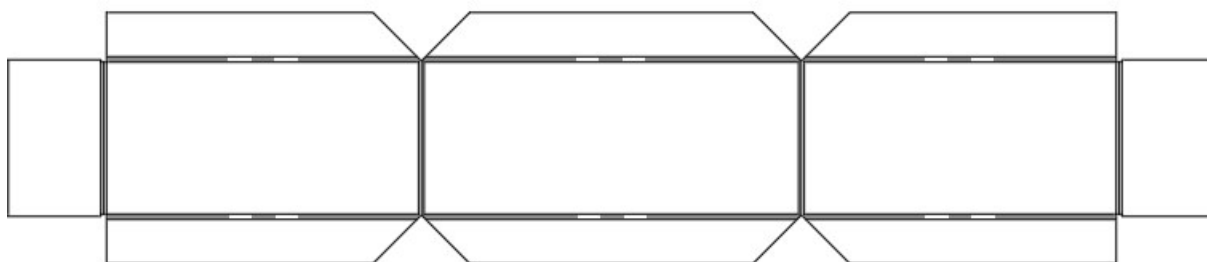


Obrázek 10 – Rozvin ocelového třmenu



Obrázek 11 – Vytvarovaný třmen

Doplňkem třmenu je papírová izolační vložka, jejíž tvar je patrný z *obrázku 12*. Tento tvar je navržen tak, aby vložka přesně pasovala do vytvarovaného třmenu a obepnula svazek transformátorových plechů. Výsledný tvar vložky je uveden na *obrázku 13*.

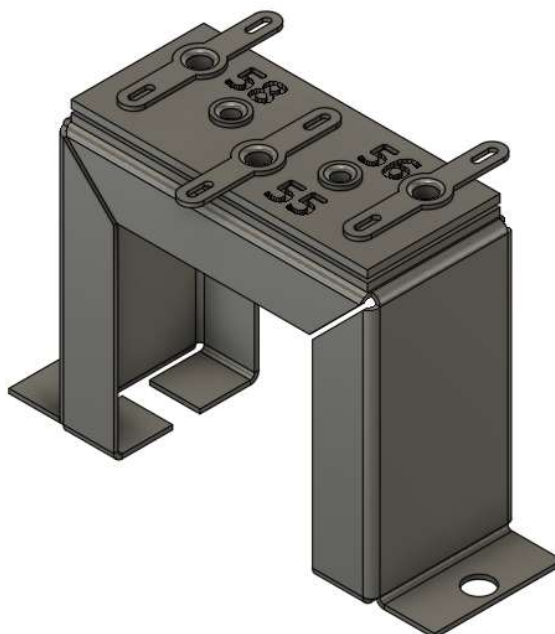


Obrázek 12 – Návrh papírové vložky



Obrázek 13 – Vytvarovaná papírová vložka

Svorkovnice je tvořena dvěma pertinaxovými deskami rozměru $17 \times 38 \text{ mm}$ síly 1 mm a trojicí mosazných kontaktů. Vrchní deska je opatřena popisem svorek respektujícím původní číslování tlumivky. Otvory v ose obou desek o průměru 3 mm jsou určeny k přinýtování mosaznými nýty k ocelovému třmenu. Otvory o průměru 4 mm vrchní desky jsou určeny k přinýtování kontaktů. Spodní deska slouží jako izolace mezi kontakty na vrchní desce a ocelovým třmenem. *Obrázek 14* znázorňuje 3D vizualizaci sestavy třmenu a svorkovnice.



Obrázek 14 – Vizualizace sestavy třmenu a svorkovnice

4.3 Použité izolační materiály

Vývody vinutí jsou opatřeny izolačním návlekm, který slouží jednak jako přídavná izolace lakovaného měděného vodiče, též jej však chrání před mechanickým poškozením. Z důvodu mechanické ochrany byl zvolen izolační návlak ze skelné tkaniny nasycený PUR. [9]

Jako prokladová izolace mezi jednotlivými vinutími byla zvolena PE samolepící páska 3M™ ET 1350F [10]. Tato páska byla zvolena i jako fixace vinutí před závěrečnou bandáží návinu. Vhodnou alternativou se jeví též páska Tesa 4108. Závěrečná bandáž je tvořena samolepící páskou ze skelné tkaniny, která byla zvolena pro svou větší mechanickou odolnost. [11]

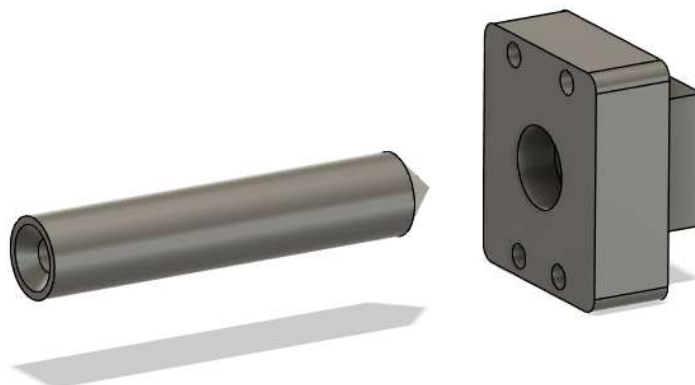
Zhotovený návin byl impregnován jednosložkovou izolační pryskyřicí na bázi Polyesterimidu s označením Voltatex 4001 za pomoci technologie VPI [12]. Svazek jader byl fixován izolačním lakem Elmotherm FS190 [13].

5 Výroba autotransformátoru

5.1 Výroba navíjecího trnu

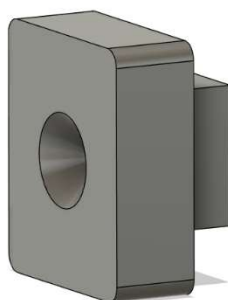
Za předpokladu, že nebude vyrobeno více než několik jednotek kusů, předmětného autotransformátoru, bylo rozhodnuto, že navíjecí trn bude zhotoven za pomoci 3D tisku z materiálu PETG. Rozměry navíjecího trnu korespondují s rozměry složené skládané kostry. Navíjecí trn byl navržen tak, aby byl nejen co nejjednodušší, ale též aby zcela vyplňoval montážní prostor pro jádro a zároveň zajišťoval dostatečnou oporu oběma čelům navíjecí komory.

Již při designování navíjecího trnu bylo pamatováno na budoucí jednoduchost tisku a minimum tiskových podpor. Díky vhodnému návrhu bylo docíleno toho, že tiskové podpory nebyly vůbec zapotřebí. Unášecí díl navíjecího trnu byl navržen dle vizualizace na *obrázku 15*. Z té je patrná jeho dvoudílná konstrukce, kdy je trn rozdělen na upínací stopku a oporu kostry s průchozími otvory pro vodiče jednotlivých vinutí. Tyto dvě součásti byly spojeny lepením pomocí kyanoakrylátového lepidla.



Obrázek 15 – Vizualizace unášecí poloviny navíjecího trnu

Druhá polovina navíjecího trnu je modifikací předchozí sestavy, přičemž v tomto případě byly vypuštěny otvory pro vodiče a upínací stopka. Ta je nahrazena kuželovým otvorem pro hrot oporného upínacího koníku navíjecího stroje.



Obrázek 16 – Vizualizace přídržné poloviny navíjecího trnu

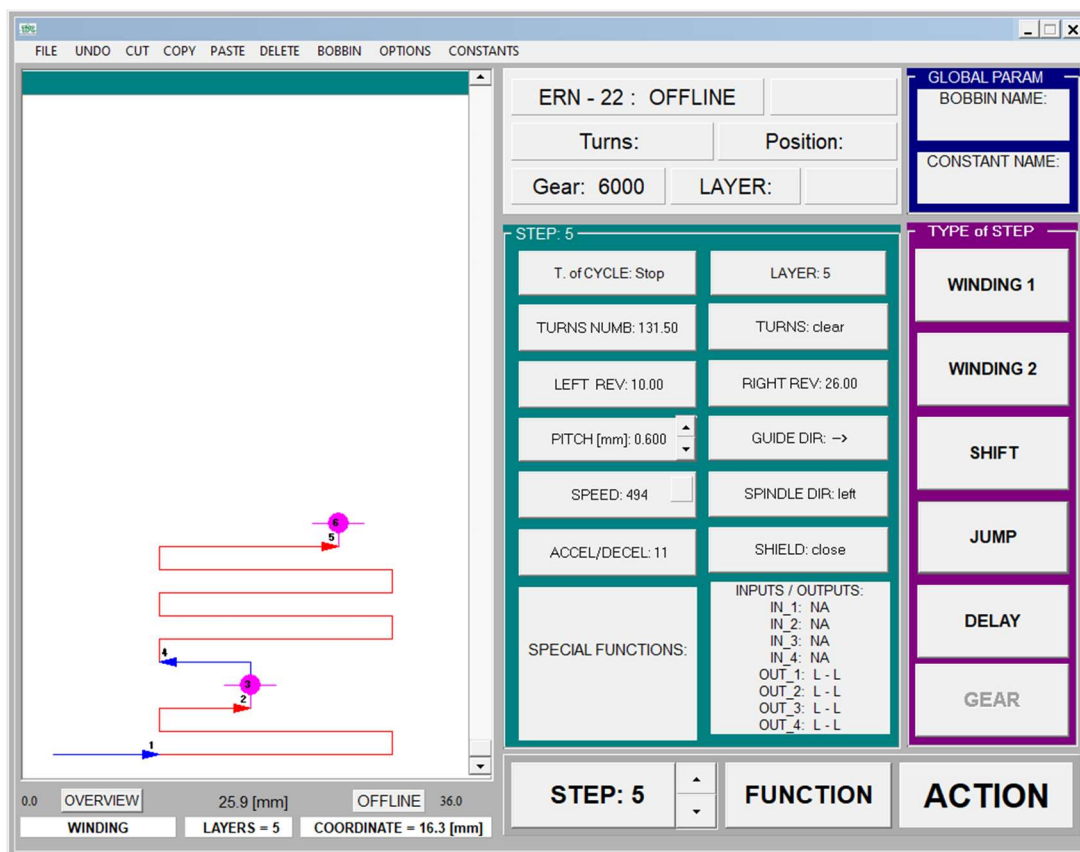
5.2 Popis a programování strojní navíječky TPC ERN 22

Navinutí autotransformátoru bylo provedeno na stolní lineární navíječce TPC ERN 22 [15]. Základem stroje je otáčivé vřeteno s kleštinami, kolečkový naváděč drátu a řídicí jednotka, viz *obrázek 17*. Z důvodu univerzálnosti navíjecího stroje je třeba vybavit jej vhodným příslušenstvím; tím nejnütnějším je odvíječ drátu a navíjecí trn. Ten se jedním koncem vkládá do kleštin vřetena a koncem druhým přesně kopíruje celou dutinu v kostře cívky. Ta je k trnu fixována například za pomoci šroubu. V případě dvoudílného navíjecího trnu je trn rozdělen v prostoru kostry a stroj vybaven i oporným koníkem s oporným hrotem, s jehož pomocí jsou obě poloviny navíjecího trnu stlačovány k sobě.



Obrázek 17– Lineární navíjecí stroj TPC ERN 22 s příslušenstvím

Stroj je ovládán řídicí jednotkou s navíjecími programy ve formě smyčky jednotlivých po sobě jdoucích kroků. Programování stroje lze provádět buďto v PC v softwaru Design system – Graphic [14], nebo přímo na řídicí jednotce navíjecího stroje, přičemž tímto způsobem se navíjecí program i snáze precizuje. Vizualizace programu ze softwaru je na *obrázku 18*.



Obrázek 18 – Vizualizace navíjecího programu

Navíjecí program pro ATr je tvořen pouhými šesti kroky. Sled programových kroků a jejich parametry jsou zaznamenány v *tabulce 2*.

Tabulka 2: Navíjecí program

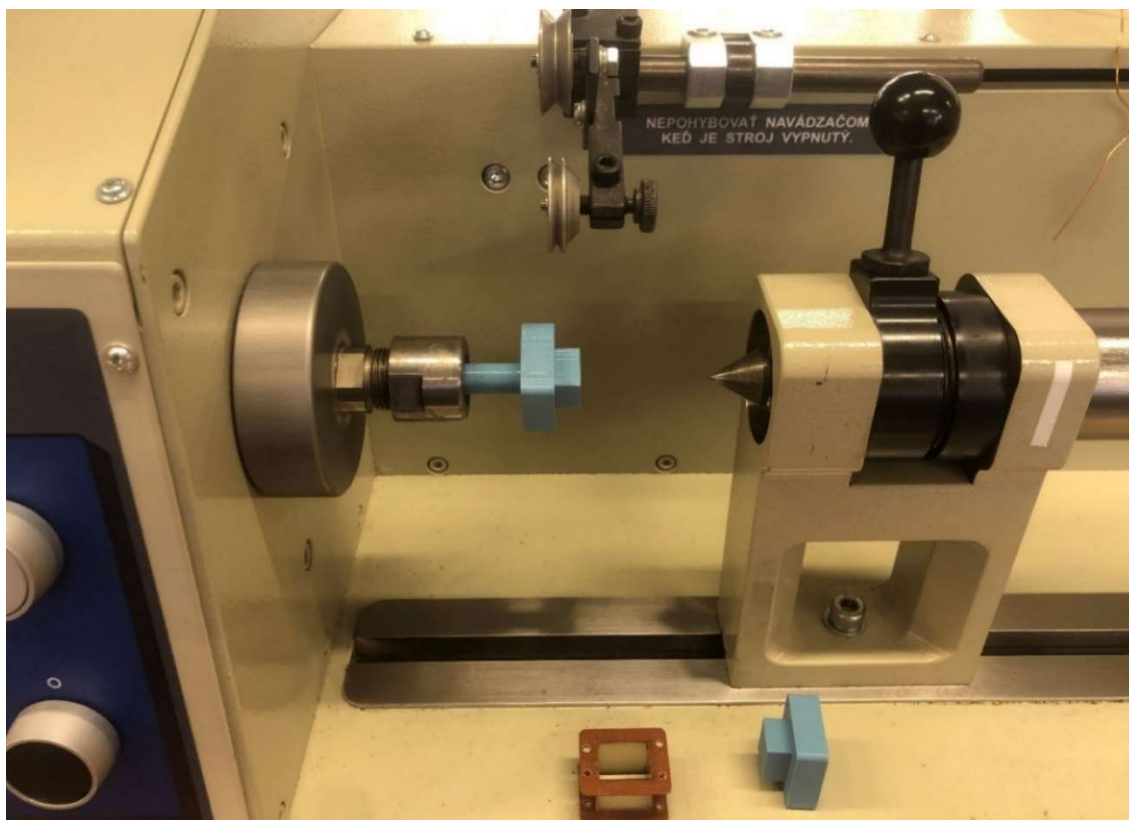
Typ kroku	Pozice naváděče	Rychlost posuvu naváděče	Levý reverzační bod	Pravý reverzační bod	Počet otáček vřetena	Rychlost otáčení vřetena	Směr otáčení vřetena	Posun naváděče na otáčku vřetena	Směr posuvu naváděče
1 Přesun	10	100	-	-	-	-	-	-	-
2 Otáčení vřetena	-	-	10	26	42,5	500	Vlevo	0,9 mm	Vpravo
3 Otáčení vřetena	-	-	0	0	1	350	Vlevo	0	Vpravo
4 Přesun	10	100	-	-	-	-	-	-	-
5 Otáčení vřetena	-	-	10	26	131,5	500	Vlevo	0,6 mm	Vpravo
6 Otáčení vřetena	-	-	0	0	2	350	Vlevo	0	Vpravo

Z *tabulky 2* je zřejmé, že je využito dvou základních typů kroku, a to „přesun“ a „otáčení vřetena“. Pokynem pro přesun se ovládá samotný naváděč drátu. V prvním a čtvrtém kroku je uváděn do výchozí polohy. Typicky je to levá hrana navíjecí komory kostry. Následuje

pokyn pro otáčení vřetena, kde se nastaví požadovaný počet závitů, rychlost a směr otáčení vřetena, rychlost posuvu naváděče drátu, reverzační body určující šířku navíjecí komory, případně další parametry jako rychlost rozběhu a brzdění vřetena a podobně. Třetím a šestým krokem je v tomto případě znovu pokyn pro otáčení vřetena. Ten je zde využit z důvodu strojového navinutí izolace mezi vinutí a pro závěrečnou bandáž. Během navíjení izolací nebývá programem vyžadováno uzavření ochranného štítu. Ten na tomto stroji nebyl osazen z důvodu nízkých navíjecích rychlostí a nebyl tedy vyžadován ani během navíjení vodičů.

5.3 Popis navíjení

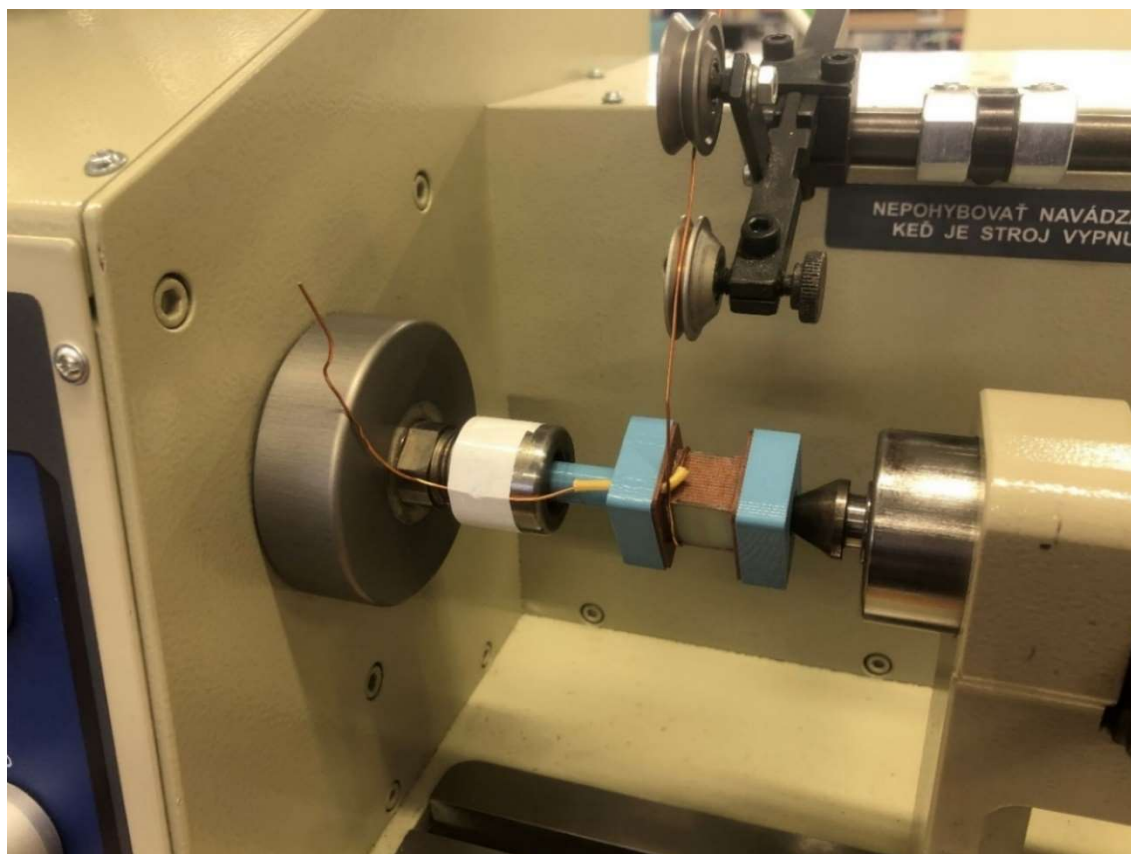
Po naprogramování bylo přistoupeno k hardwarovému přizpůsobení navíjecího stroje. Ten byl vybaven vhodným kolečkovým naváděčem, oporným koníkem, dvojicí odvíječů řady MB200 [16] a upnutím vytištěného navíjecího trnu ve vhodném sklíčidle. Po řádném seřízení bylo možné začít se samotným navíjením na předem připravenou skládanou kostru. Jak již bylo zmíněno výše, příprava kostry spočívala ve složení pomocí zámkových klíčů a fixací čel navíjecí komory kyanoakrylátovým lepidlem.



Obrázek 19 – Seřízený navíjecí stroj TPC ERN22

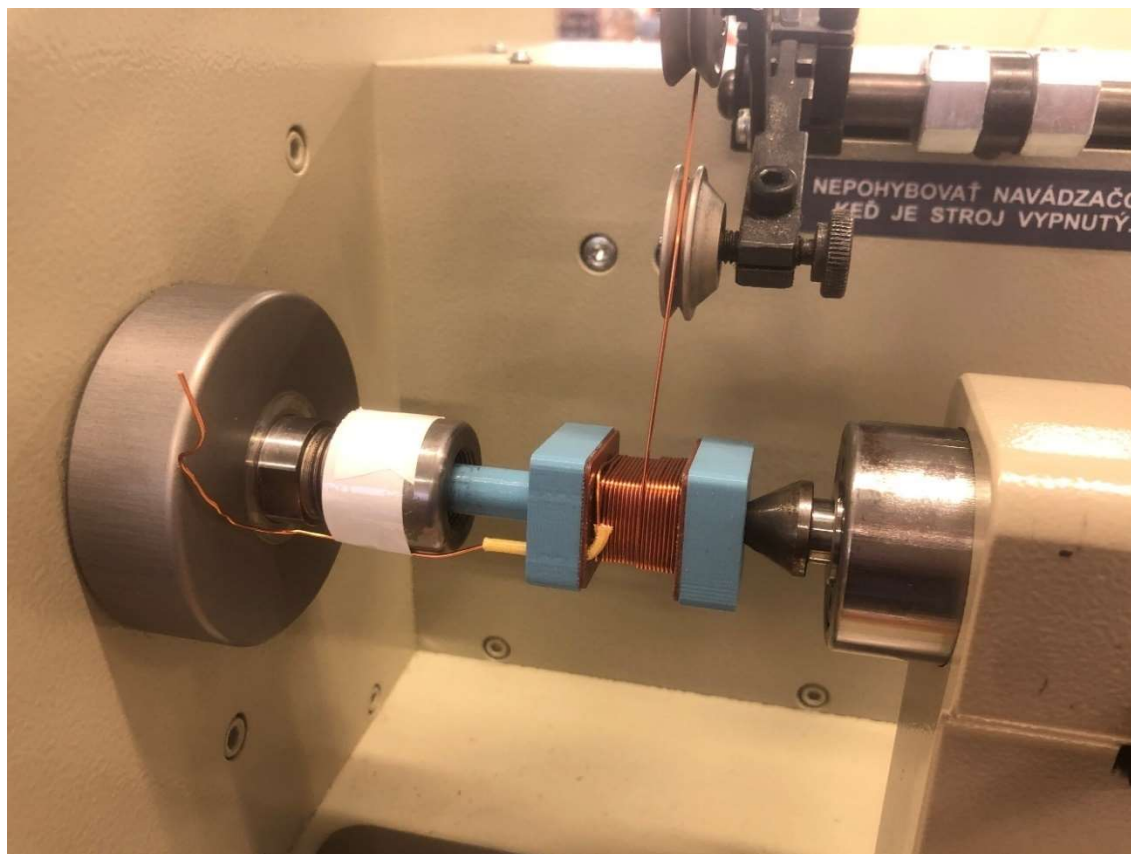
Po založení kostry do prostoru navíjecího trnu a upnutí jeho obou polovin na vřeteno navíjecího stroje bylo nutné opatřit lakovaný vodič izolačním návlekm a připevnit jej ke vřetenu. Nejspolehlivějším způsobem, jak uchytit vodič vinutí ke kostře a vřetenu, je

zhotovit první závit ručně a volný konec vodiče přilepit nebo uvázat k samotnému vřetenu. To je také důvod, proč je navíjecí program psán na počet závitů o jeden nižší, než je celkově požadovaný počet závitů jednotlivých vinutí. Dále bylo zapotřebí kvůli konstrukci kostry a navíjecího trnu protáhnout vodič včetně izolačního návleku otvorem v kostře a navíjecím trnu a přilepit volný konec ke vřetenu za pomoci lepicí pásky. Tím bylo zajištěno, že se během navíjení vodič neuvolní.



Obrázek 20 – Založená kostra v navíjecím trnu se zhotoveným prvním závitem

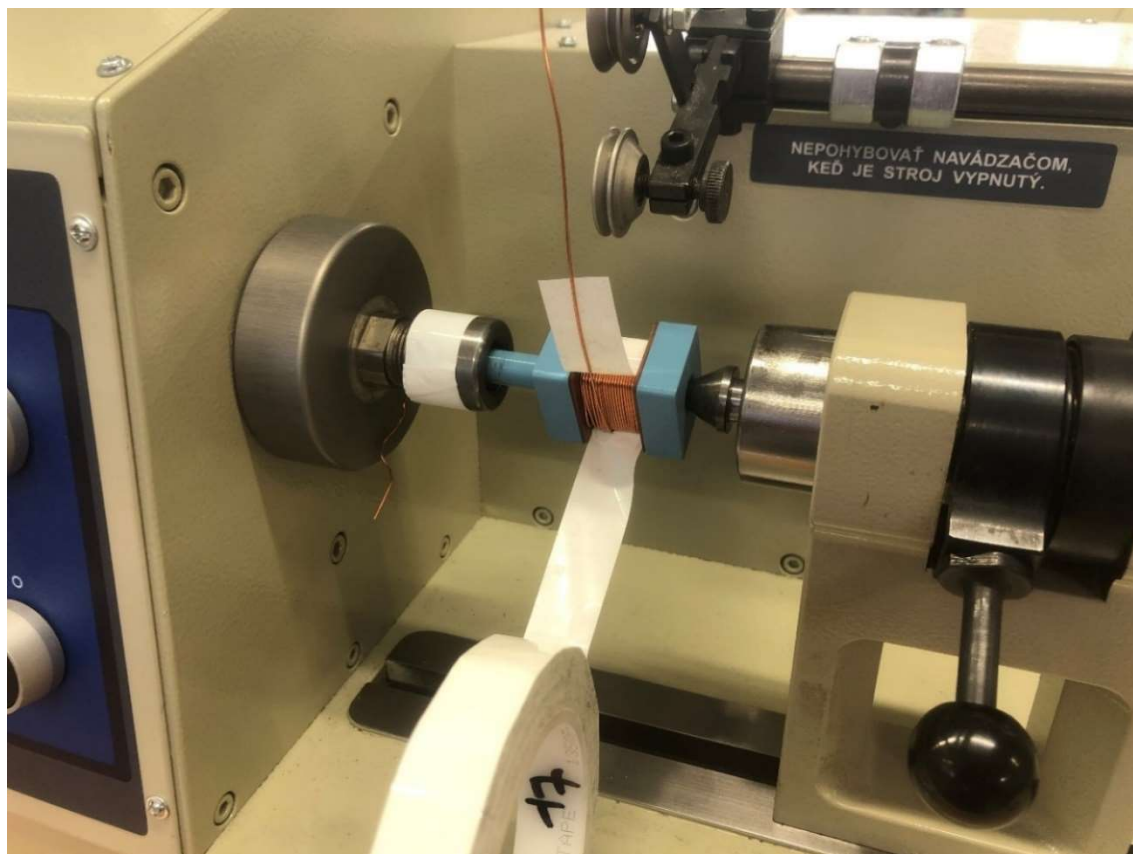
Sešlápnutím pravého ovládacího pedálu byl navíjecí stroj uveden do pohybu a vřeteno bylo roztočeno přiměřenou rychlostí, přičemž maximální možné otáčky vřetena byly programem omezeny na 500 ot/min , což vyplývá z *tabulky 2*. Jednou z funkcí ovládacího pedálu je řízení rychlosti otáčení vřetena, což je funkce srovnatelná s funkcí plynového pedálu osobního automobilu. Z tohoto důvodu je ovládání navíjecího stroje pro obsluhu veskrze intuitivní. Při dosažení potřebného počtu závitů je vřeteno stroje samo zastaveno, i kdyby obsluha držela pedál neustále stlačený. Tím je zaručen správný počet závitů vinutí. V tomto případě tak nastalo po navinutí celkových $43,5$ závitů vodiče $0,75 \text{ mm}$ (počítáno včetně ručního závitů). „Půl závit“ je nutný z toho důvodu, že se konec vinutí nachází na zadní straně kostry. Při správném a rovnoměrném rozložení závitů v navíjecí komoře toto odpovídá celkem dvěma a půl vrstvám vodiče.



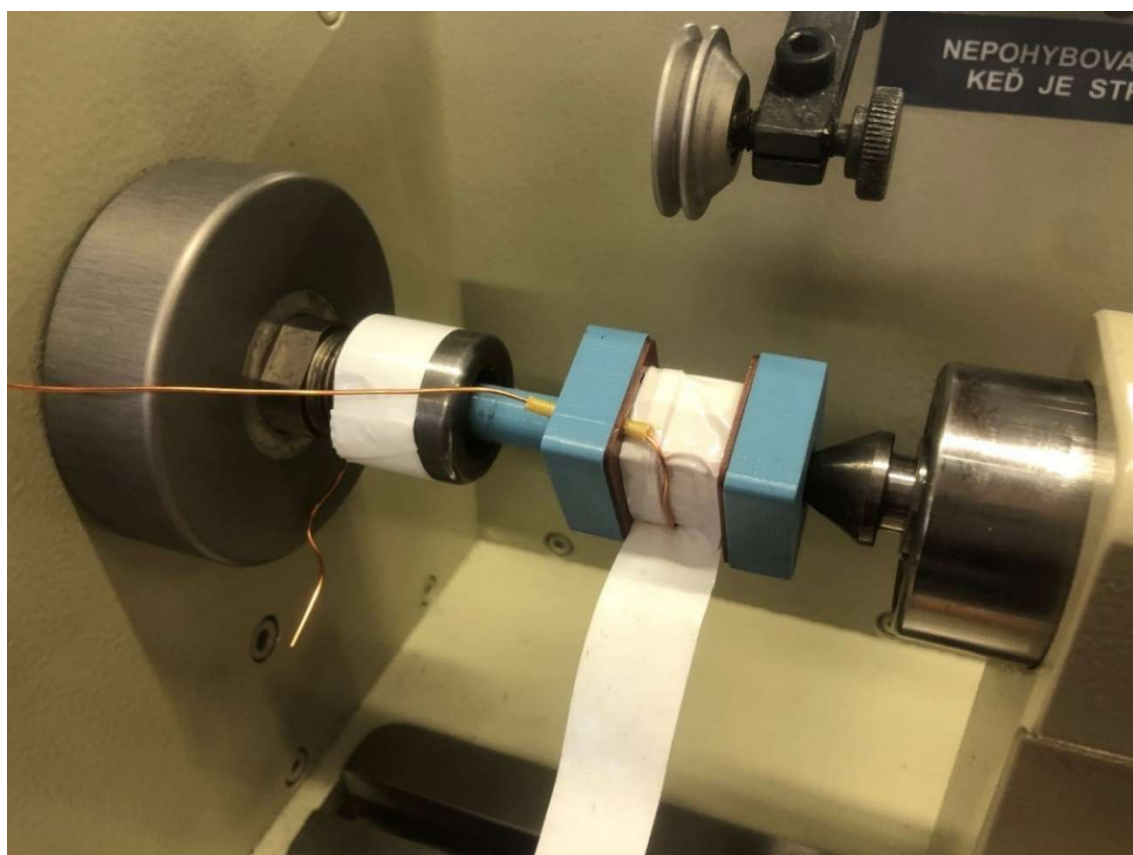
Obrázek 21 – Navinutá první polovina druhé vrstvy vodiče 0,75 mm v navíjecí komoře

Korektní ukončení vinutí je prováděno tak, že je nejprve nalepena na vinutí lepicí PE páska tvořící izolaci mezi vinutími, a až poté odštíhnut vodič vedoucí k odvíječi MB200. V případě, že by vinutí nebylo fixováno páskou, hrozí jeho povolení a následné zvětšení objemu vinutí, což by mohlo vyústit v následek, kdy se do navíjecí komory nevejde požadovaný počet závitů vodiče, případně rovnou k vymotání části vinutí. Tento způsob ukončení vinutí je znázorněn na *obrázku 22*.

Další důležité pravidlo pro vyvedení vodiče z navíjecí komory se využije, pokud vývod kříží část vinutí; v takovém případě musí být v této části podlepen izolační páskou nebo vybaven izolačním návlekm. To značně omezí možnost elektrického průrazu a mezizávitového zkratu na vinutí. Ten hrozí především tam, kde vznikne křížení vodičů na nejrozdílnějším elektrickém potenciálu, například pokud je poslední vrstva vinutí vinuta od pravého okraje navíjecí komory směrem k jejímu levému okraji, přičemž vyvedení obou konců vinutí směřuje z pravého okraje navíjecí komory. V takovémto případě musí být vývod veden napříč celou navíjecí komorou zpět k pravému okraji, kde by hrozilo největší riziko průrazu izolace a zkratu. V tomto případě je riziko minimální, avšak i přesto byla tato zásada při výrobě ctěna, jak je zachyceno na *obrázku 23*, znázorňujícím použití kombinace podlepení izolační páskou i izolačního návleku.

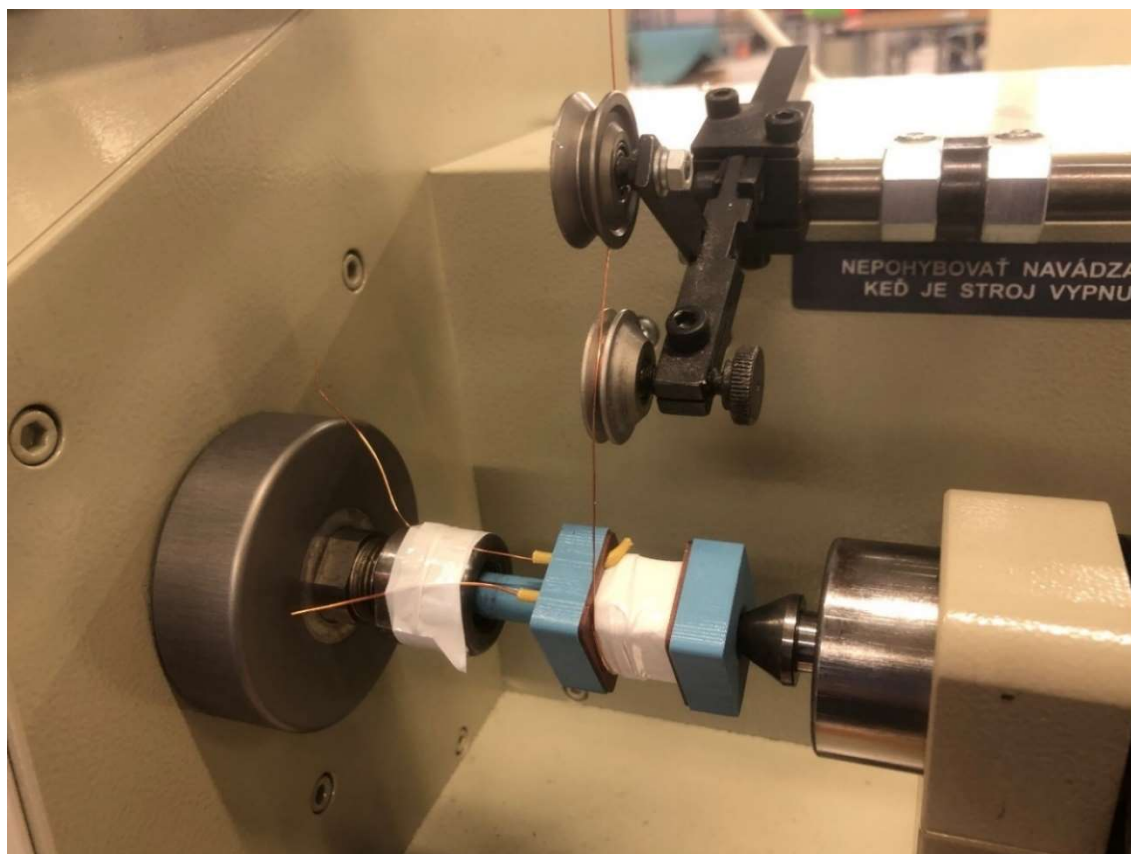


Obrázek 22 – Fixace vinutí před ustříhnutím navíjeného vodiče



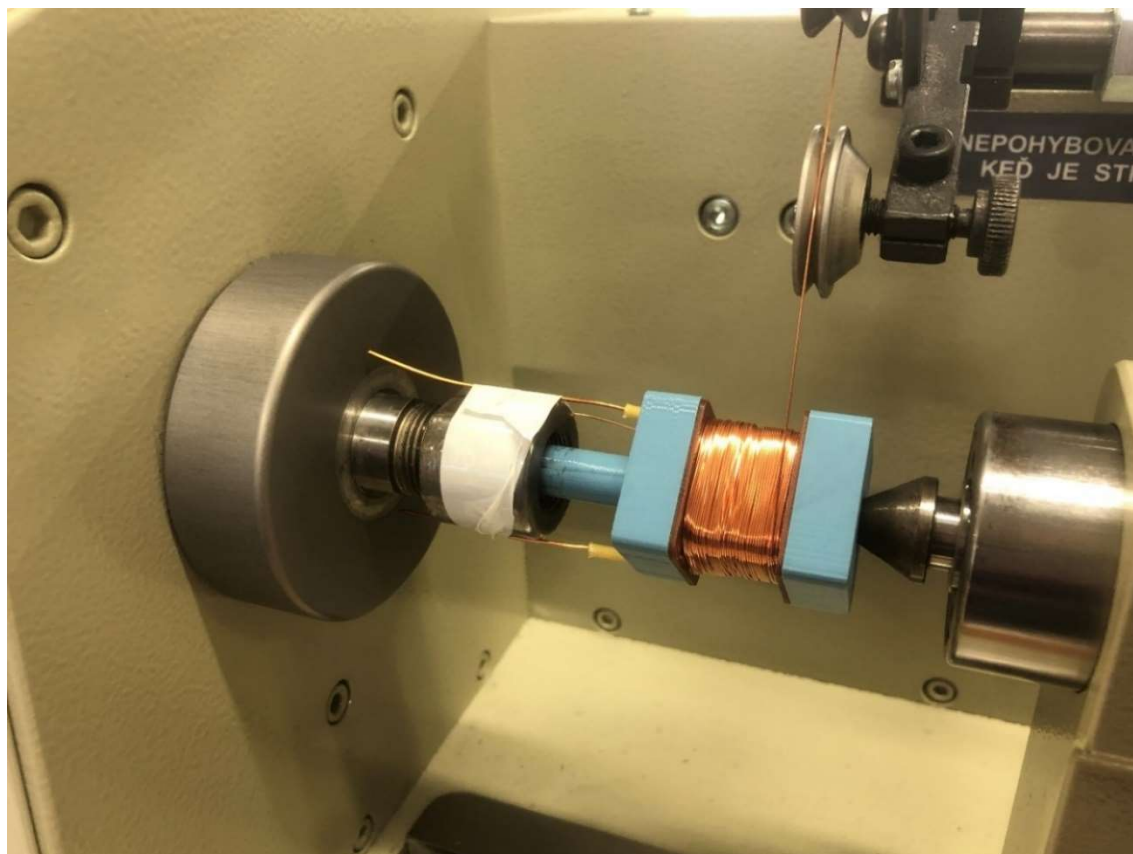
Obrázek 23 – Korektní vyvedení konce vnutí z navíjecí komory

Po splnění výše uvedených předpokladů na zaizolování konce vinutí je možno přistoupit k navinutí izolace mezi vinutími PE páskou. Po jejím zhotovení lze zavést vodič průměru $0,4\text{ mm}$ opatřený izolačním návlekem a začít navíjet druhé vinutí. To je provedeno stejně jako tomu bylo u prvního vinutí, tj. první závit navinout na kostru ručně a vodič protáhnout otvorem kostry a trnu a upevnit páskou ke vřetenu navíjecího stroje. Tuto situaci zachycuje *obrázek 24*.

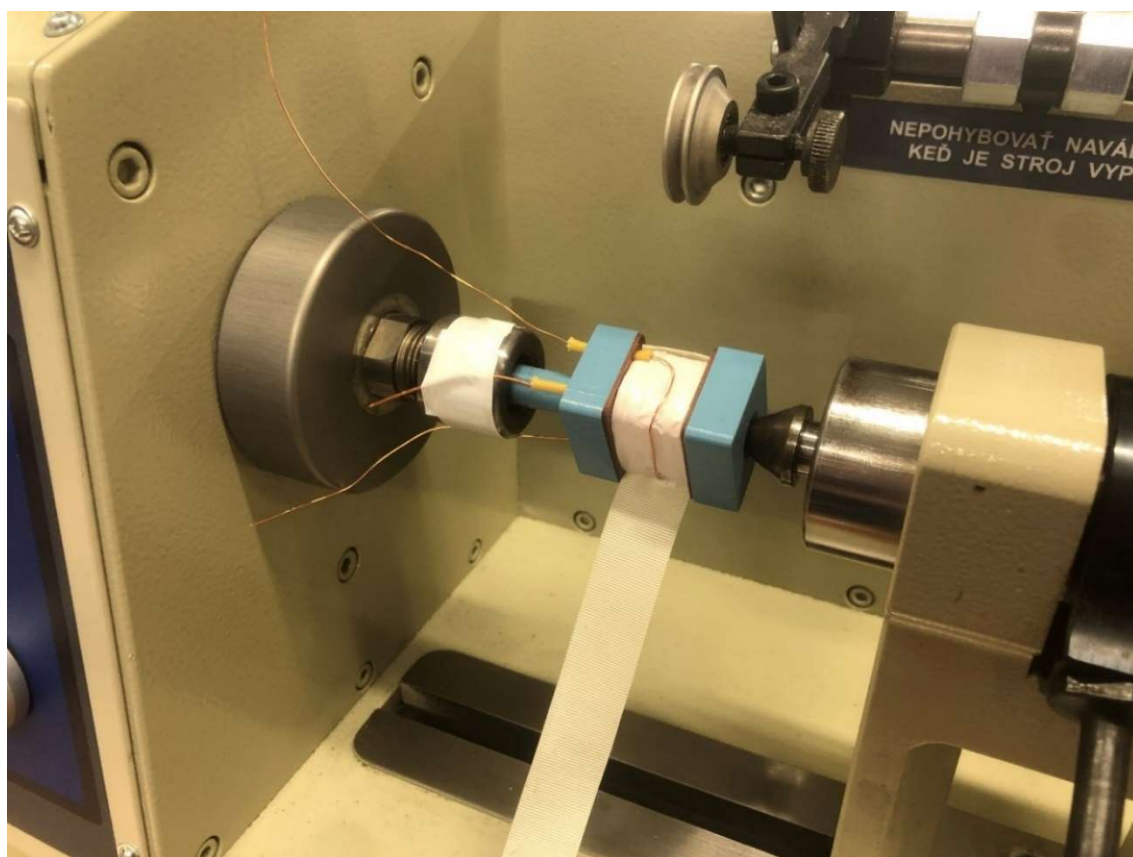


Obrázek 24 – Začátek druhého vinutí veveden z navíjecí komory

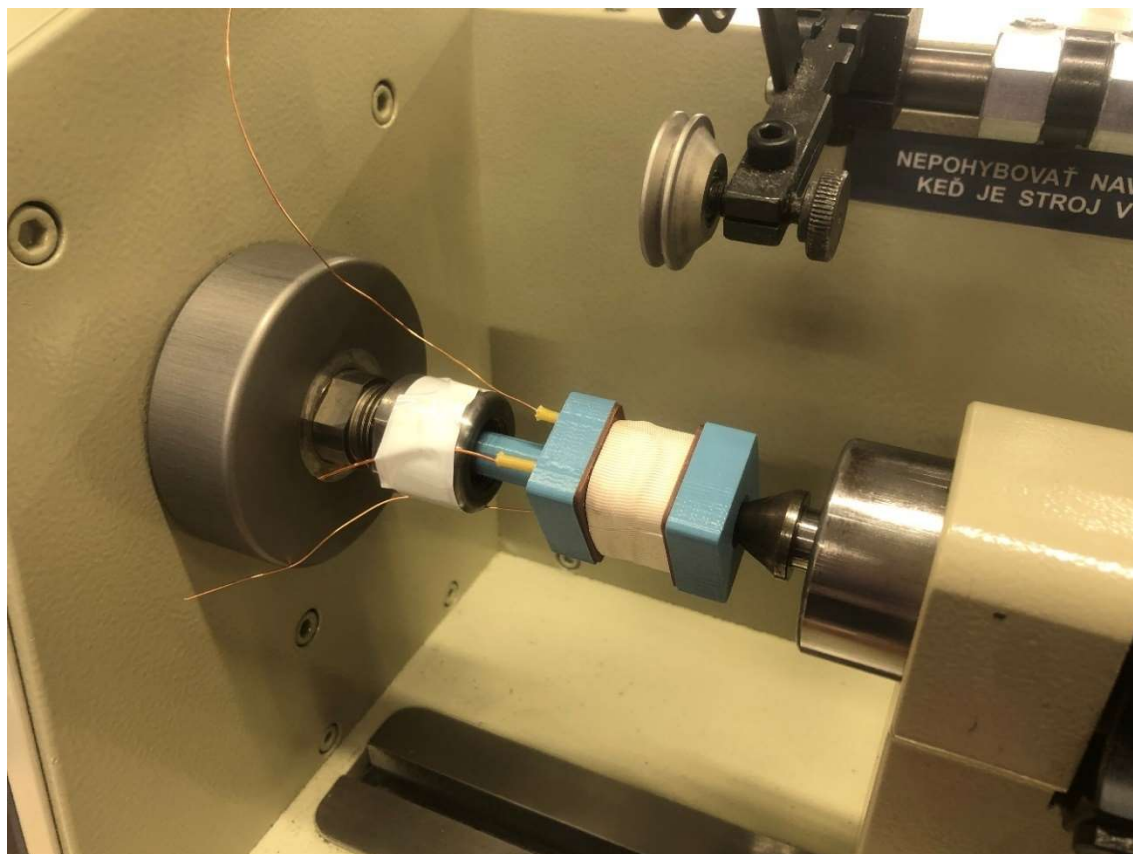
Po sešlápnutí ovládacího pedálu bylo obdobným způsobem jako první vinutí navinuto i vinutí druhé. To je tvořeno celkem $132,5$ závitů vodiče rozloženého v necelých pěti vrstvách v navíjecí komoře. Vzhledem k menšímu průměru vodiče bylo zapotřebí pečlivějšího vedení vodiče uvnitř navíjecí komory, aby bylo vinutí navinuto co nejrovnoměrněji a předešlo se tak zbytečnému křížení vodiče, což je zachyceno na *obrázku 25*. Ukončení vinutí bylo provedeno dle výše popsaného standardu za použití izolační PE pásky pro fixaci a pásky se skelnou tkaninou pro závěrečnou bandáž. Tato situace je znázorněna na *obrázku 26*. Páska se skelnou výztuží tvořící povrchovou bandáž vinutí zajistí krom izolace i jeho mechanickou ochranu proti poškození.



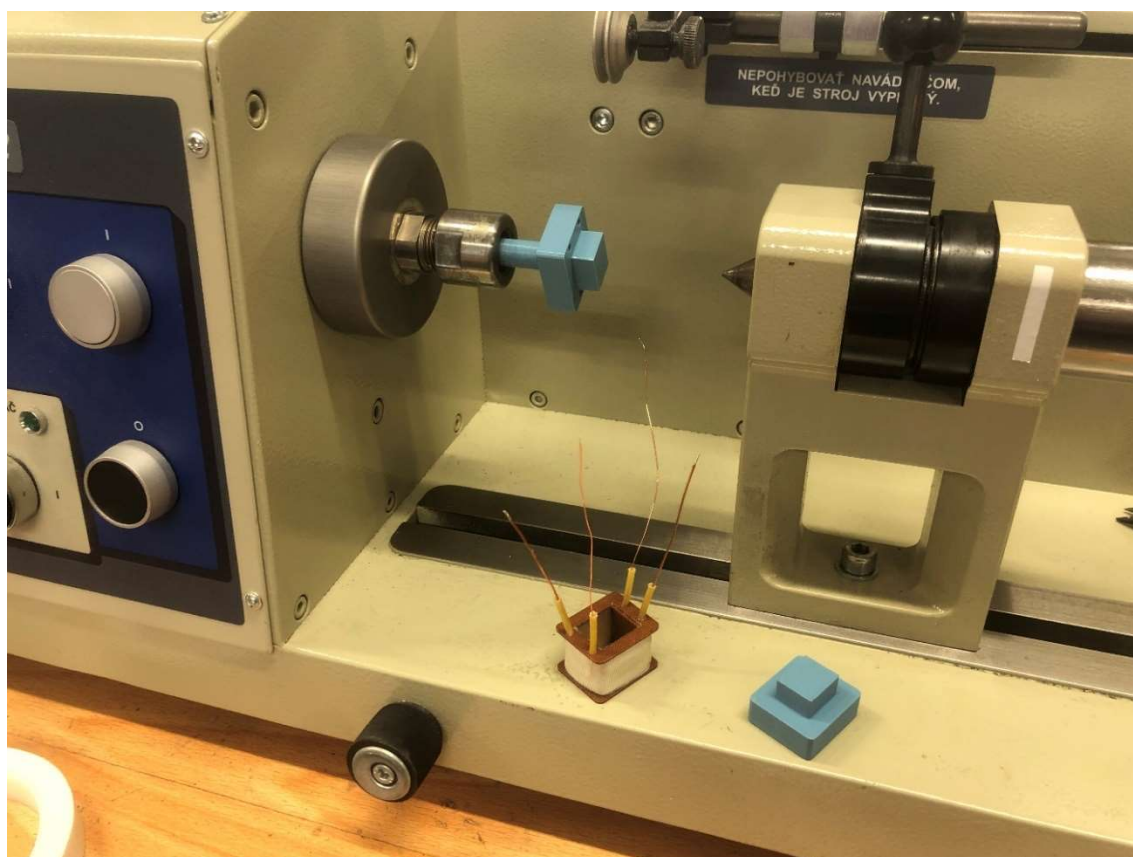
Obrázek 25 – Průběh navíjení druhého vinutí



Obrázek 26 – Konec druhého vinutí veveden z navíjecí komory



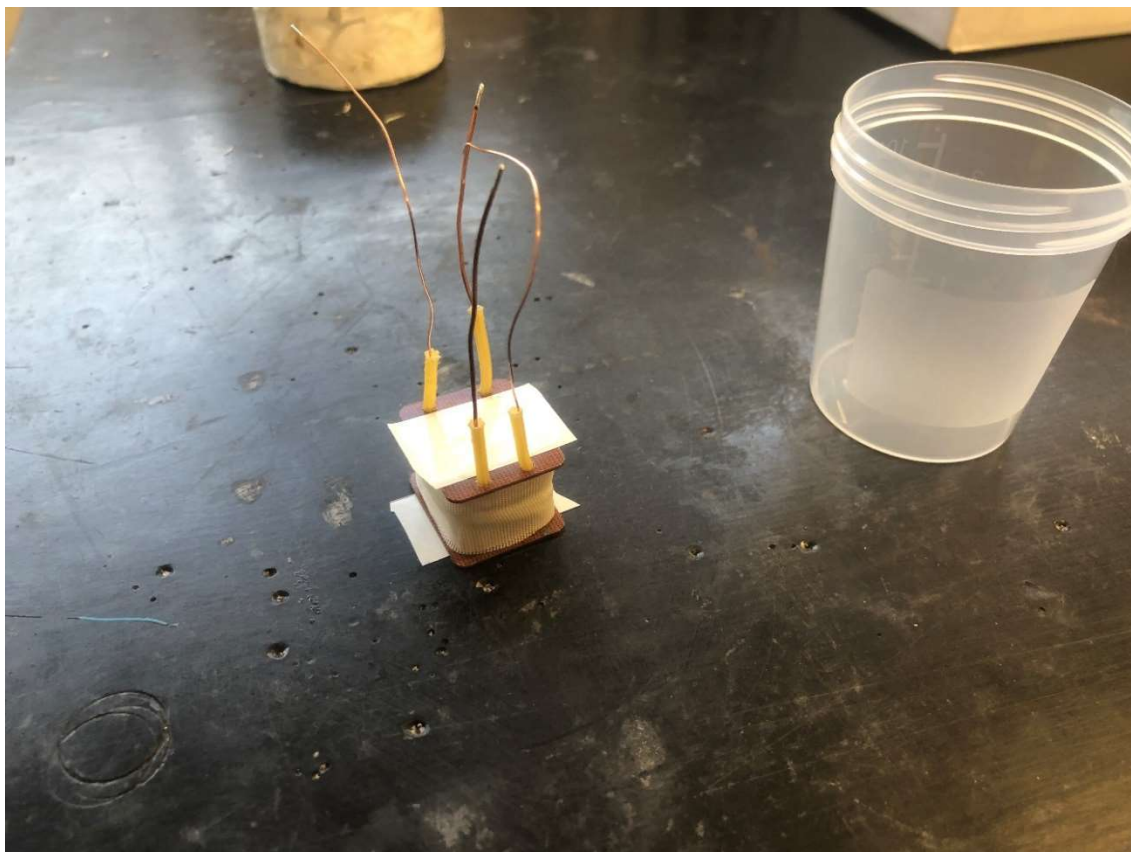
Obrázek 27 – Zhotovená závěrečná bandáž vinutí



Obrázek 28 – Kompletně navinutá cívka

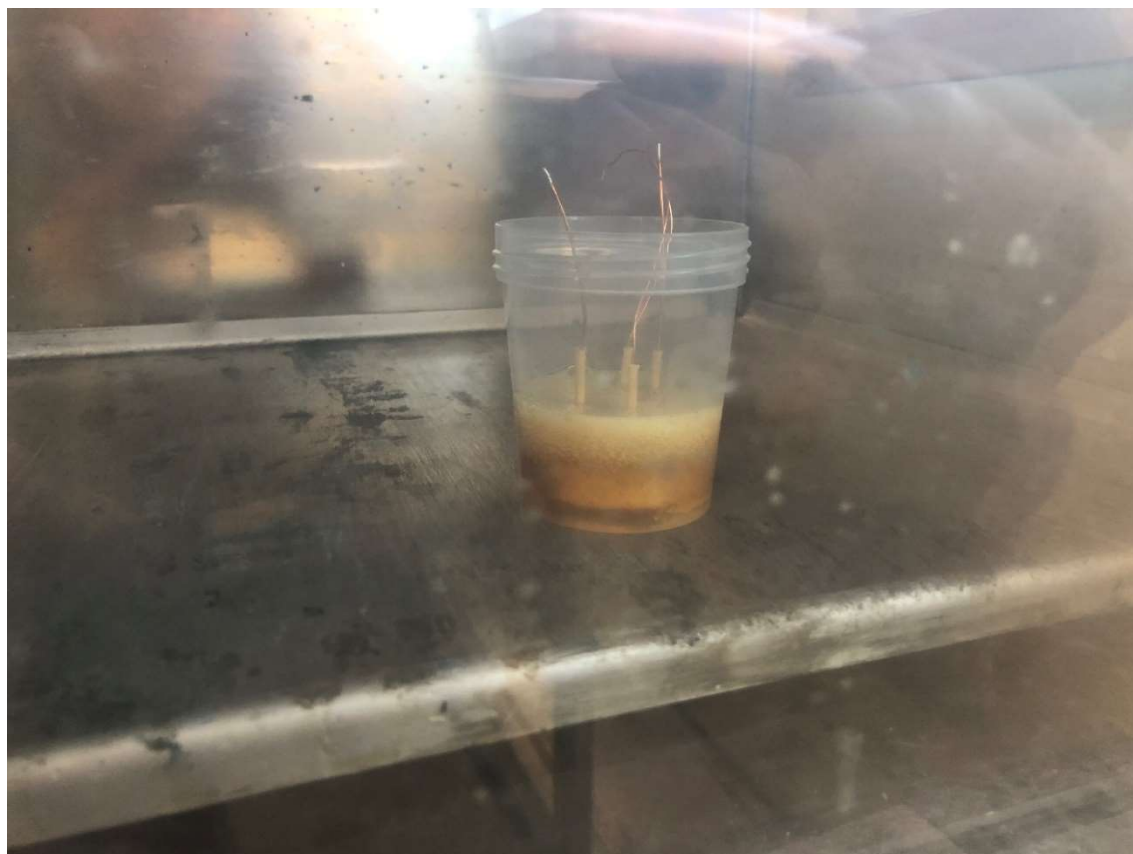
5.4 Impregnace vinutí

Impregnace vinutí byla provedena technologií VPI. Z důvodu budoucího snadnějšího vložení transformátorových plechů tvořících jádro autotransformátoru bylo nutné utěsnit středový otvor kostry, aby nebyl nalakován. Vrstva laku v těchto prostorech by v krajním případě mohla znemožnit budoucí montáž transformátorových plechů. Utěsnění bylo provedeno přelepením otvoru izolační PE páskou 3M. Způsob je jasně zřetelný z *obrázku 29*.

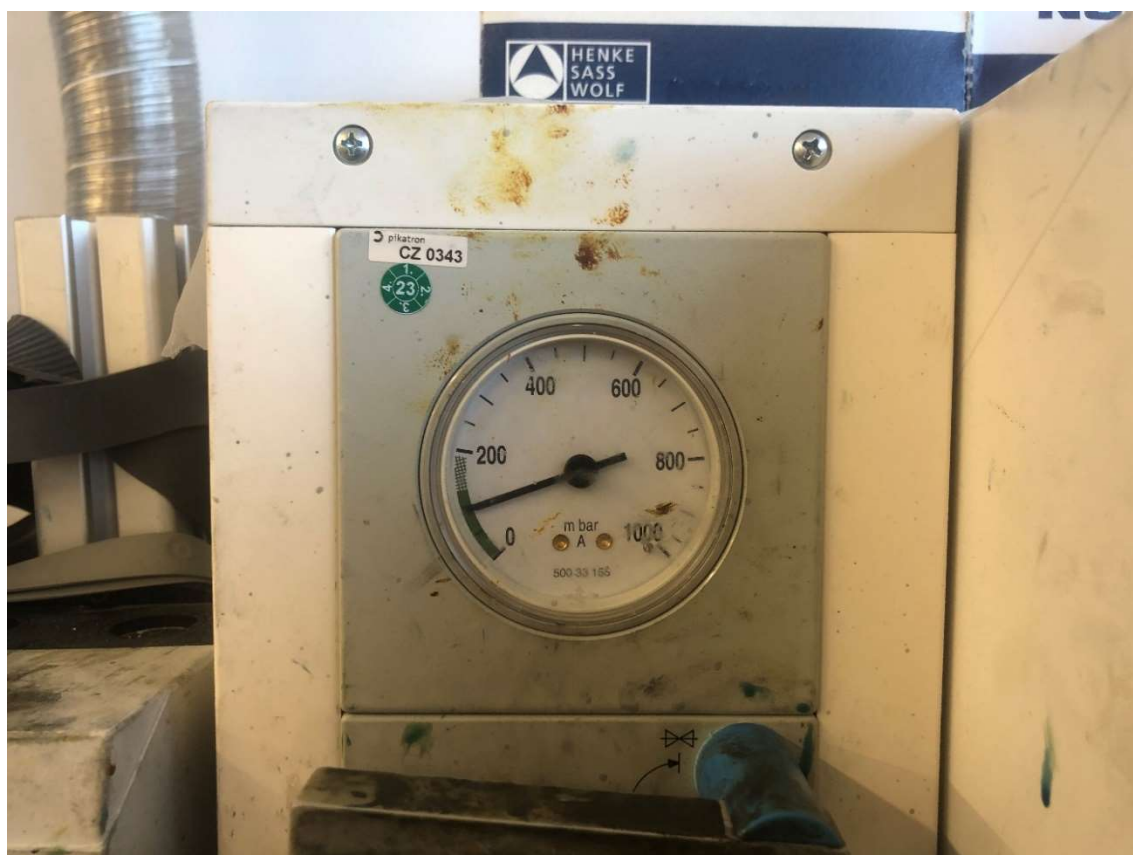


Obrázek 29 – Vinutí připraveno na impregnaci

Samotná impregnace byla provedena ponořením vinutí do jednosložkové impregnační pryskyřice Voltatex 4001 a následného vakuování. Vakuování je nutné, aby pryskyřice dostatečně nasýtila vinutí, izolační návlek, a vyplnila všechny dutiny, kde zlepši izolační vlastnosti. Krom izolace je prosycením izolačních materiálů docíleno i zlepšení mechanických vlastností. Slouží totiž po vytvrnutí jako spolehlivé pojivo srovnatelné s matricí kompozitních materiálů. Vakuování bylo provedeno za pomoci vývěvy za sníženého tlaku na $p_n = 100 \text{ mbar}$. Tato hodnota podtlaku je ze zkušeností vhodná pro vytažení dostatečného množství vzduchu a vyplnění dutin. Množství vytaženého vzduchu z prostoru vinutí je možno odvodit z *obrázku 30*. Vinutí autotransformátoru bylo v tomto tlaku ponecháno po dobu dvou minut. Tato časová prodleva ponechává pryskyřici dostatek času k tomu, aby zatekla tam, kde je požadována.



Obrázek 30 – Vinutí během impregnace



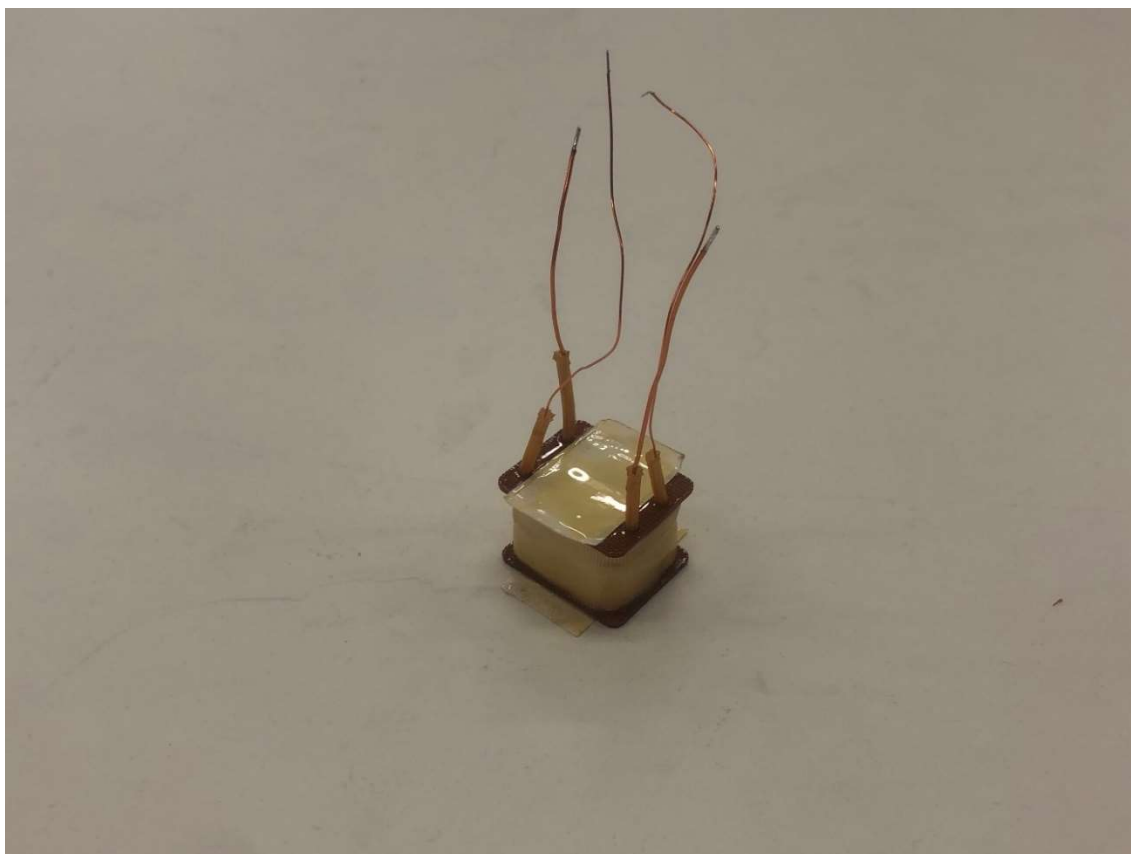
Obrázek 31 – Tlak během impregnace

Po vyjmutí vinutí z impregnační pryskyřice bylo nutné odsát její přebytky z povrchu vinutí. K tomu postačuje vhodný absorpční materiál, v tomto případě papírová utěrka, na jejímž povrchu bylo vinutí v různých polohách ponecháno „okapat“, viz *obrázek 32*. Tento proces se nesmí uspěchat a často na něm závisí budoucí montáž jader či mechanické rozměry impregnovaných dílů. Přebytečná pryskyřice během procesu tvrdnutí vytváří při větší vrstvě boule, kvůli kterým by nemusely být dodrženy mechanické rozměry, znemožňovaly by tamponový tisk a případně i následující požadované technologické operace. V tomto konkrétním případě by vznik takových boulí nebyl kritický, nicméně hrozilo by přilepení k savé podložce během vytvrzování za zvýšené teploty ve vytvrzovací peci.



Obrázek 32 – Odsátí přebytečné impregnační pryskyřice

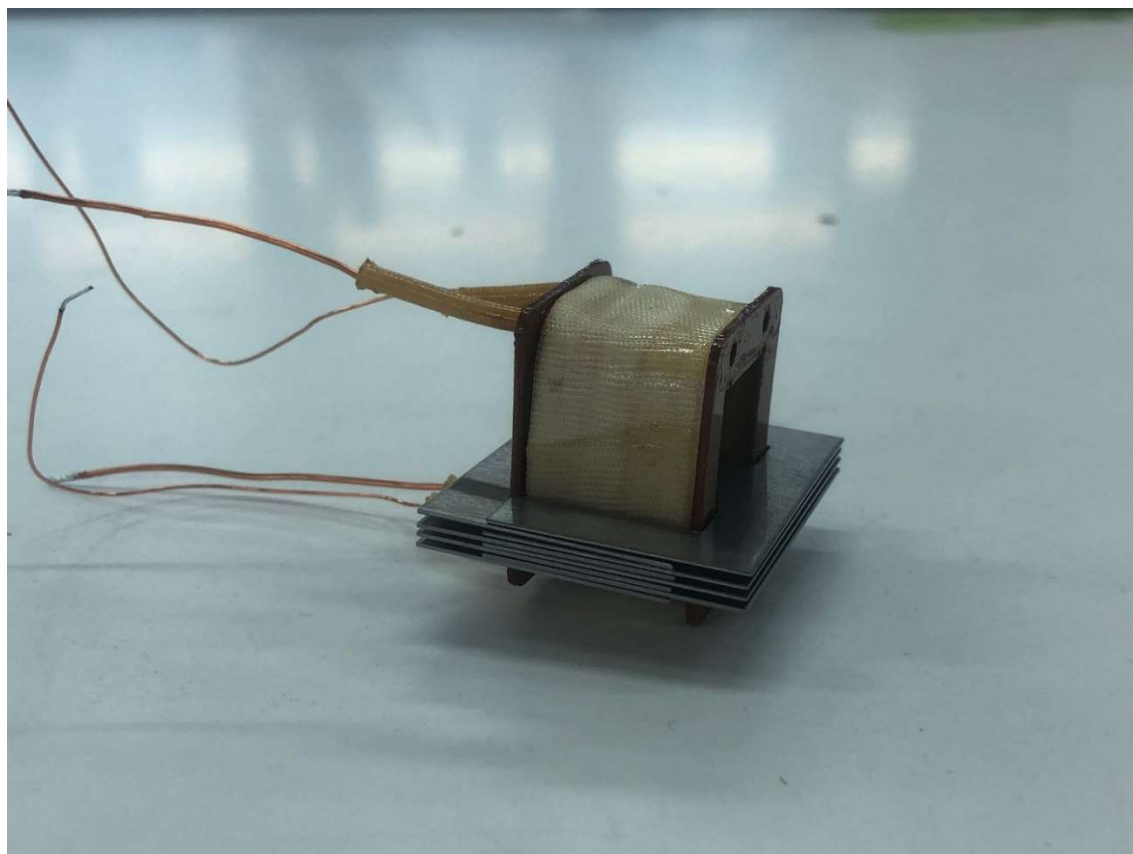
K vytvrzení impregnační pryskyřice je zapotřebí teploty minimálně $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, při které dojde k plnému vytvrzení za 7-8 hodin. K urychlení procesu je možné použít vyšší teplotu. Při teplotě $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ dojde k vytvrzení za 2 hodiny. Maximální možná teplota doporučená výrobcem je $150\text{ }^{\circ}\text{C}$; při takové teplotě dojde k vytvrzení pryskyřice za 60 minut. Navzdory faktu, že pryskyřice spadá do teplotní třídy H [17], odpovídající maximální teplotě $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ [18], bylo vytvrzení provedeno za teploty $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Této teplotě odolá i PE izolační páska, která spadá do teplotní třídy B s teplotou $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10], tvořící utěsnění prostoru pro montáž jádra. Na *obrázku 33* je zachyceno vinutí po jeho vytvrzení.



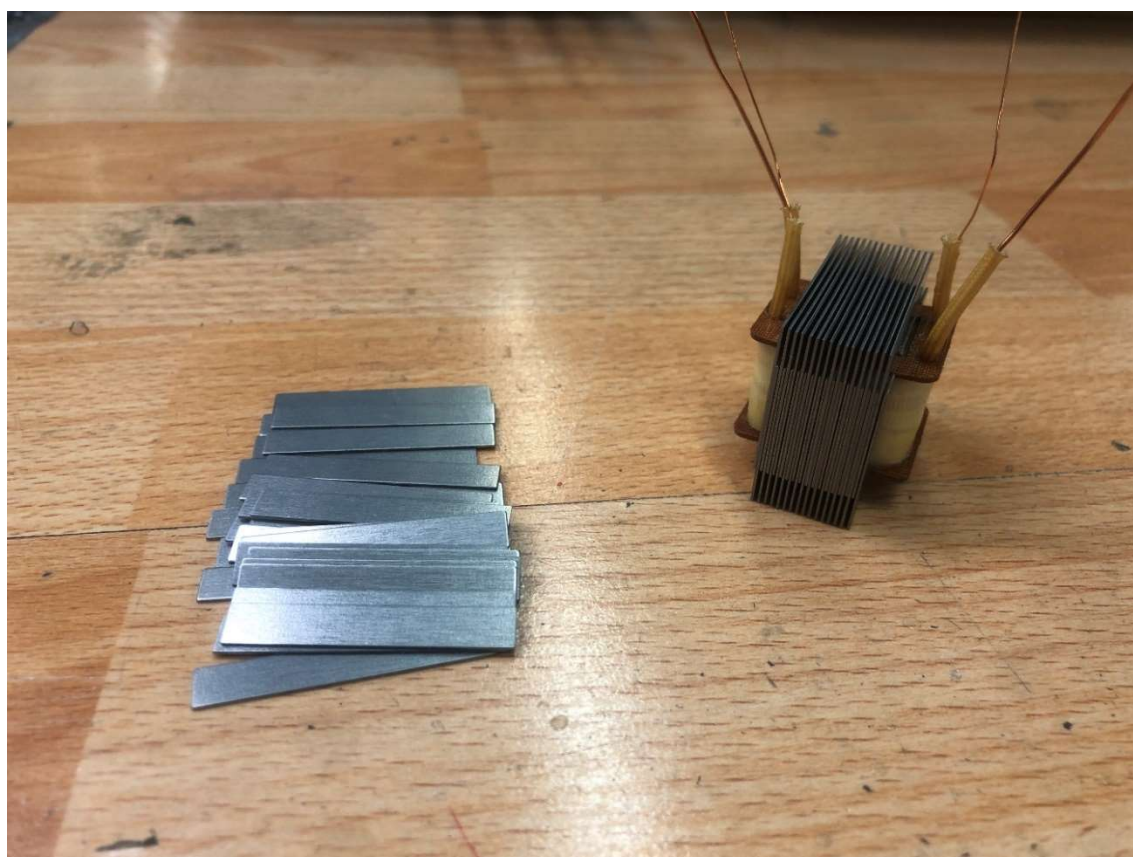
Obrázek 33 – Vytvrzené vinutí po procesu impregnace

5.5 Montáž jádra

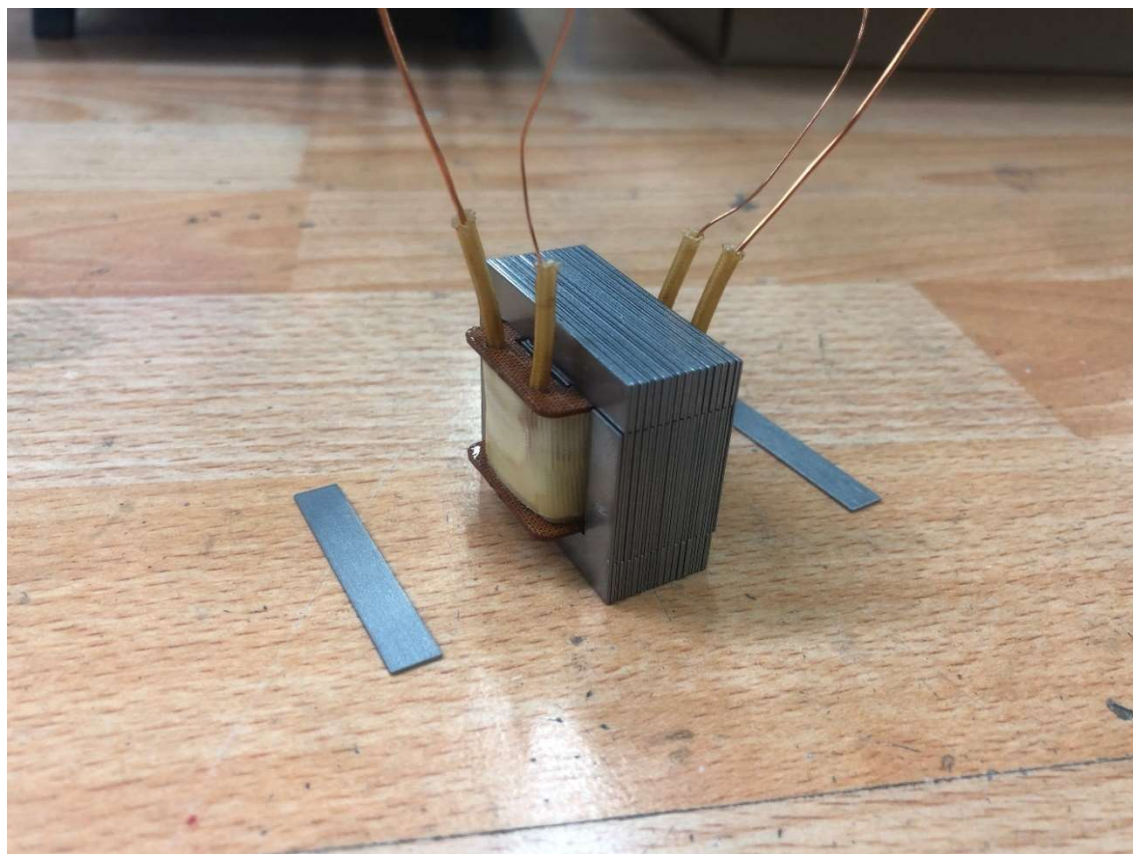
Po vytvrzení vinutí byla odstraněna již dále nepotřebná izolační páska, tvořící utěsnění osazovacího prostoru transformátorových plechů. Montáž byla prováděna ručně skládáním E plechů do montážního otvoru střídavě z obou stran. Postup je znázorněn na *obrázku 34*. Při tomto způsobu montáže je většinou nutné poslední plech svazku do montážního prostoru vpravit za pomoci lisu, na což však bylo pamatováno již při návrhu kostry, tudíž byla ponechána potřebná vůle pro jeho snadnou montáž. Plně postačilo rukou stlačit svazek prvních 31 plechů směrem k sobě a následně poslední plech vložit. Po uvolnění tlaku na svazek se tento vrátil do původní pozice, přičemž pevně zafixoval i poslední 32. plech svazku. Po vložení všech E plechů vznikl prostor pro vložení I plechů. Ten je jasně patrný z *obrázku 35*. I plechy jsou v prostoru svazku přidržovány tlakem okolních E plechů. To ovšem neplatí u krajních I plechů, které nemají oporu na obou stranách, viz *obrázek 36*. Jejich fixaci bylo nutné zajistit jiným způsobem. Jako vhodný způsob spojení se ukázalo přilepení pomocí jednosložkové impregnační pryskyřice Beck's FS 170. Tato na vzduchu tvrdnoucí pryskyřice posloužila jako lepidlo s vhodnými mechanickými a izolačními vlastnostmi. Z toho důvodu jí byl prosycen celý svazek plechů, jak je znázorněno na *obrázku 37*.



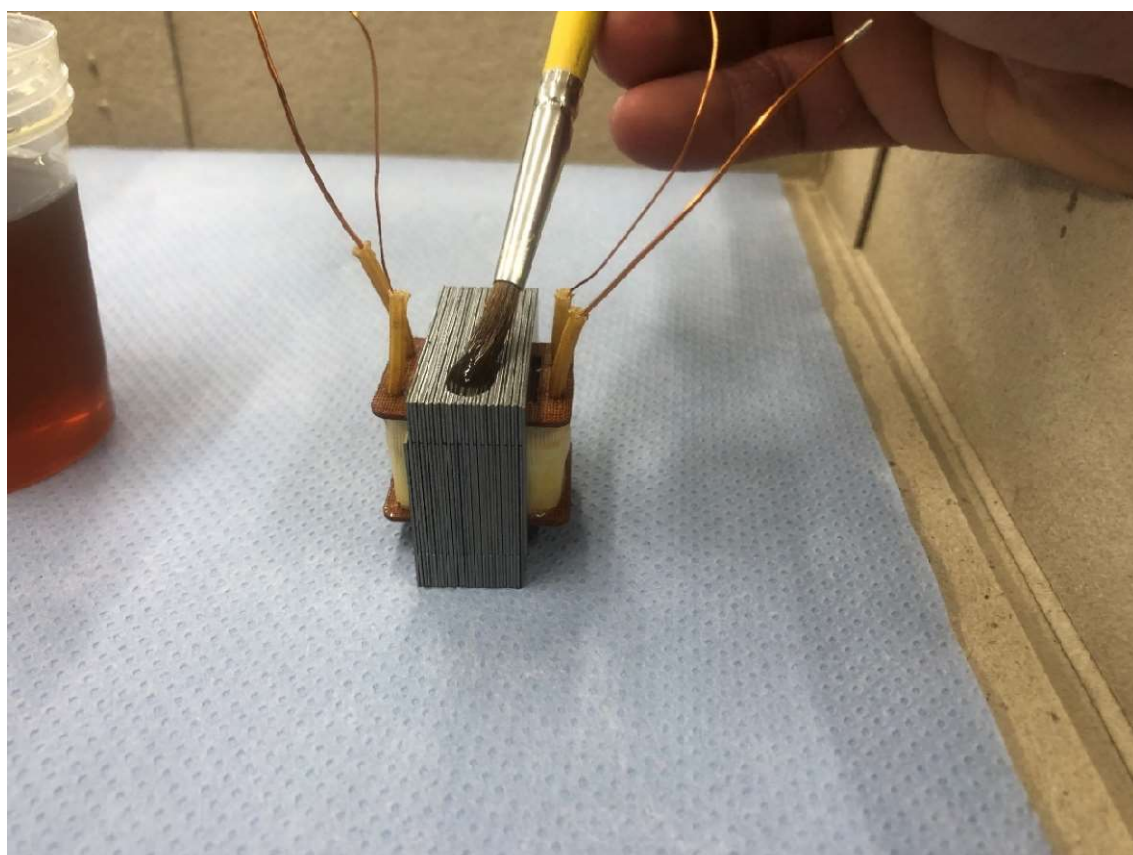
Obrázek 34 – Průběh montáže transformátorových plechů



Obrázek 35 – Průběh montáže transformátorových plechů



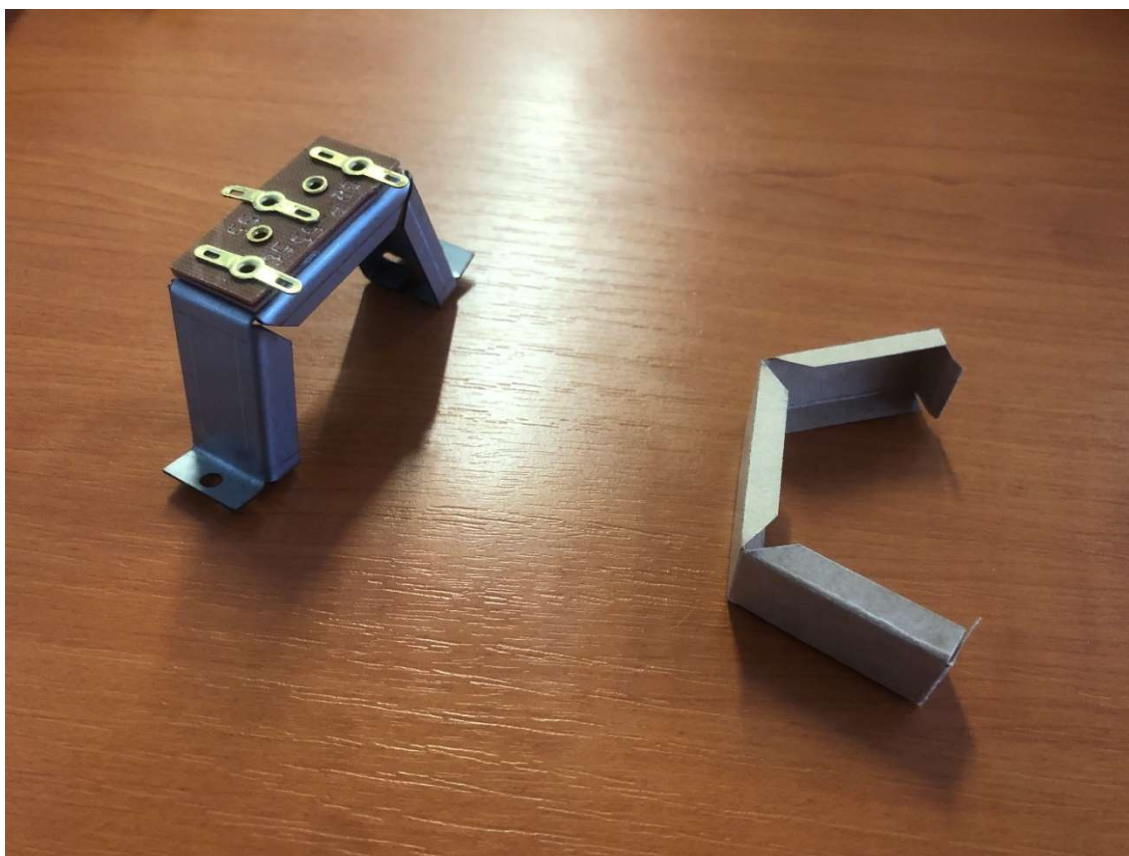
Obrázek 36 – Průběh montáže transformátorových plechů



Obrázek 37 – Impregnace svazku transformátorových plechů

5.6 Montáž třmenu a dokončení tlumivky

Naimpregnované vinutí osazené jádrem z transformátorových plechů je po předchozích úkonech připraveno na zástavbu do ocelového třmenu včetně papírové izolační vložky. Třmen, jehož popis se nachází v kapitole 4.2, bylo nejprve nutné připravit přinýtováním svorkovnice. Jako první byly na vrchní pertinaxovou desku nanýtovány mosazné kontakty. Následně byla jako celek navlečena na dvojici mosazných nýtů a doplněna o spodní izolační pectinaxovou desku. Takto vzniklá svorkovnice byla následně nanýtována na předem vytvarovaný ocelový třmen. Vzniklá sestava je na obrázku 38.

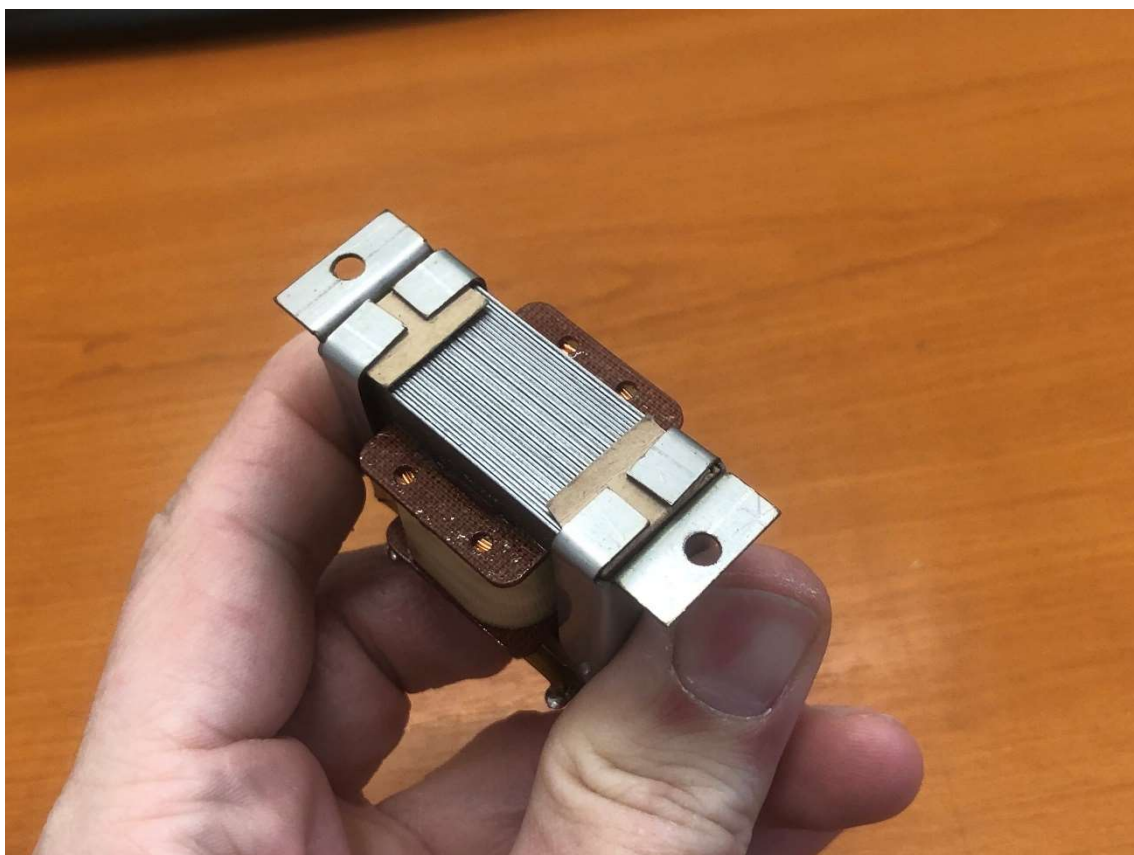


Obrázek 38 – Sestava třmenu a svorkovnice

K dokončení autotransformátoru po nasazení třmenu zbývalo připájet vývody vinutí na pájecí terminály na svorkovnici. Tento úkon byl proveden tak, aby označení kontaktů odpovídalo označení původní tlumivky dle popisu v kapitole 1.2. Tedy na svorku označenou 56 byl připájen začátek vinutí z 0,75 mm vodiče. Na svorku 58 konec vinutí z 0,4 mm vodiče. Svorka 55 je osazena zbylými dvěma vývody od obou vinutí. Ty byly nejprve vzájemně stočeny a scínovány a následně připájeny na pájecí terminál na protější straně svorkovnice. Na svorkovnici se nachází další 3 pájecí terminály určené k připojení vodičů kabeláže motocyklu. V další části této práce byly tyto volné pájecí terminály použity pro připojení měřicích přístrojů a zkušebního obvodu imitujícího kabeláž motocyklu.



Obrázek 39 – Hotový autotransformátor



Obrázek 40 – Hotový autotransformátor

6 Měření vlastností

Pro změření vlastností navrženého ATr bylo nutné ověřit chování zbylých součástí světelného obvodu. Ověřeny byly vlastnosti použitých žárovek. Díky tomu bylo možné vhodně zjednodušit měřicí schéma na *obrázku 43*, které vychází z původního zapojení v motocyklu.

6.1 Měření žárovek

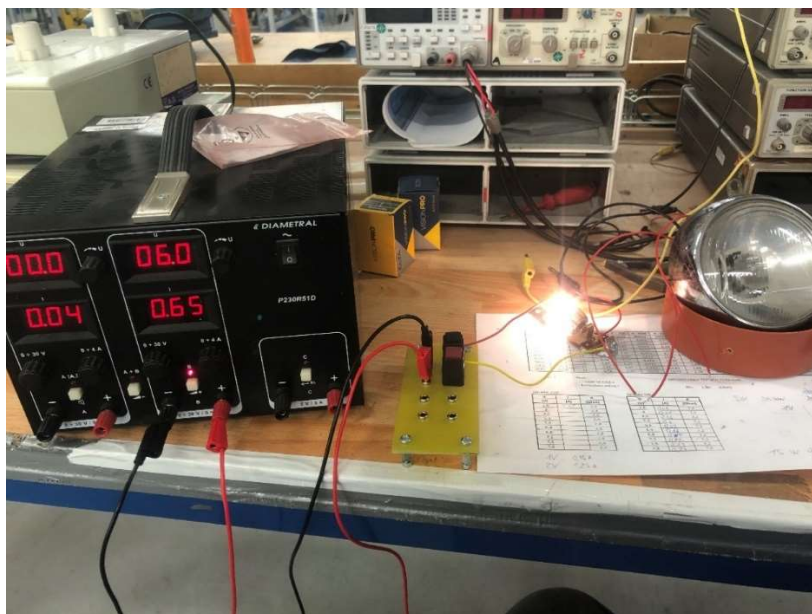
Zkoumána byla voltampérová charakteristika žárovek. Z principu činnosti tepelných světelných zdrojů vychází předpoklad, že odpor vlákna bude rozdílný v závislosti na teplotě. Závislost odporu na teplotě vychází ze *vztahu 6.1*.

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta t) \quad (6.1)$$

Kde R je odpor vlákna při teplotě t , R_0 odpor při vztažné teplotě t_0 , α je teplotní součinitel elektrického odporu a Δt rozdíl teplot dle *vztahu 6.2*. Součinitel α je pro wolframové vlákno roven $\alpha = 0,0041 \text{ K}^{-1}$ [21].

$$\Delta t = t - t_0 \quad (6.2)$$

Žárovky byly měřeny pomocí stabilizovaného zdroje stejnosměrného napětí s integrovaným voltmetrem a ampérmetrem značky Diametral, viz *obrázek 41*. Během měření bylo postupováno tak, že byla žárovka připojena na výstup zdroje, byl nastaven proudový doraz a následně bylo zvyšováno napětí. Hodnoty napětí a proudů byly odečítány po ustálení jejich hodnot, tj. po ustálení teploty vlákna. Odpor vlákna byl následně vypočten z Ohmova zákona.



Obrázek 41 – Měření vlastností žárovek

Pro žárovku předního reflektoru motocyklu byly naměřeny hodnoty zaznamenané v *tabulkách 3 a 4*. Z nich je patrný mírný rozdíl mezi vlákny žárovky určenými pro potkávací a dálkové svícení. Tento rozdíl je považován za zanedbatelný. Z této skutečnosti vyplývá možnost zjednodušit schéma na *obrázku 43*. Hodnoty změřené na vlákně žárovky zadní lampy motocyklu byly zaznamenány v *tabulce 5*. Z porovnání vypočtených výkonů obou žárovek s udávaným jmenovitým výkonem vyplývá, že jmenovitý výkon udávaný výrobcem odpovídá skutečnosti.

Tabulka 3: Žárovka 15 W (svorka 56 a)

U [V]	I [A]	R [Ω]
1,0	0,80	1,250
2,0	1,10	1,818
2,8	1,28	2,188
4,0	1,56	2,564
4,5	1,67	2,695
5,3	1,84	2,880
5,6	1,89	2,963
6,4	2,02	3,168
6,8	2,10	3,238
7,2	2,16	3,333
7,5	2,19	3,425
7,8	2,24	3,482

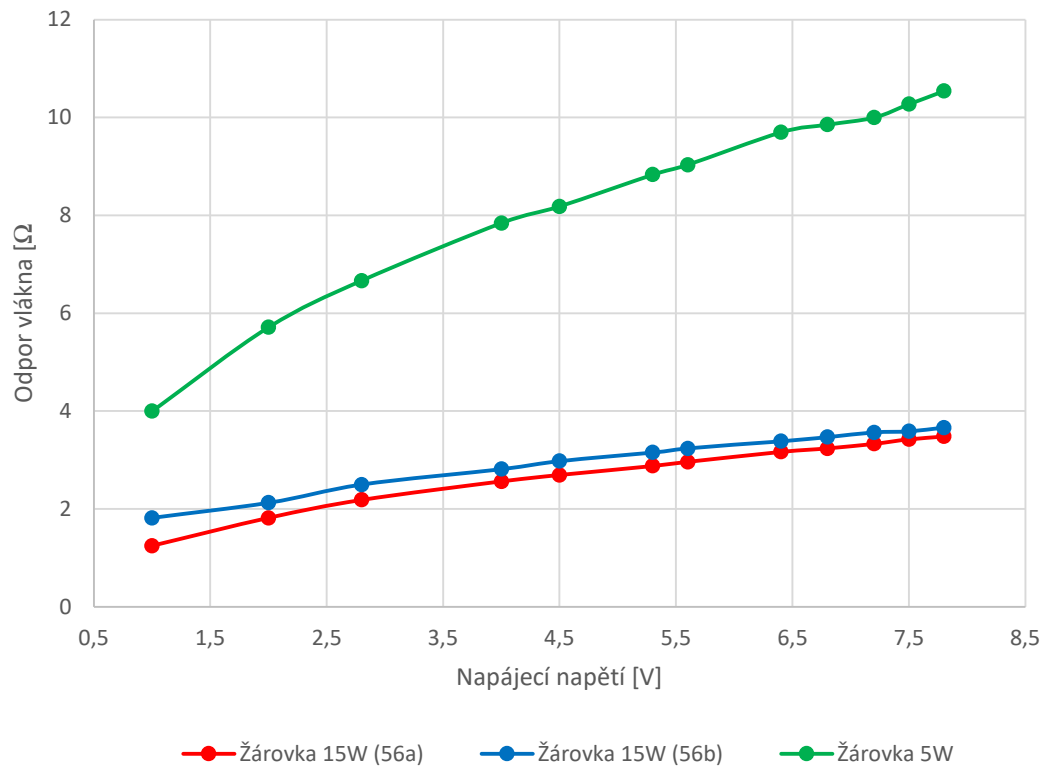
Tabulka 4: Žárovka 15 W (svorka 56 b)

U [V]	I [A]	R [Ω]
1,0	0,55	1,818
2,0	0,94	2,128
2,8	1,12	2,500
4,0	1,42	2,817
4,5	1,51	2,980
5,3	1,68	3,155
5,6	1,73	3,237
6,4	1,89	3,386
6,8	1,96	3,469
7,2	2,02	3,564
7,5	2,09	3,589
7,8	2,13	3,662

Tabulka 5: Žárovka 5 W (svorka 58)

U [V]	I [A]	R [Ω]
1,0	0,25	4,000
2,0	0,35	5,714
2,8	0,42	6,667
4,0	0,51	7,843
4,5	0,55	8,182
5,3	0,60	8,833
5,6	0,62	9,032
6,4	0,66	9,697
6,8	0,69	9,855
7,2	0,72	10,000
7,5	0,73	10,274
7,8	0,74	10,541

Z *tabulky 3 až tabulky 5* lze vynést závislost odporu jednotlivých vláken žárovek na přiloženém napájecím napětí. Závislost je znázorněna na *obrázku 42* a plně odpovídá teoretickému předpokladu, kdy s rostoucím proudem, a tedy i teplotou wolframového vlákna, bude současně růst i jeho odpor.

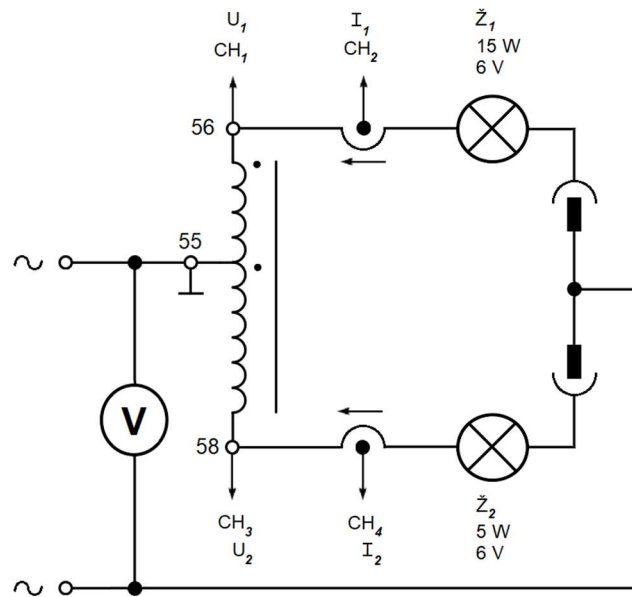


Obrázek 42 – Závislost odporu žárovek na přiloženém napětí

6.2 Ověření funkce ATr

Měření zhotoveného ATr bylo provedeno za pomoci nastavitelného autotransformátoru v laboratořích KEV FEL ZČU na síťové frekvenci 50 Hz. Zkušební měřicí obvod byl zapojen dle schématu na *obrázku 43*, kdy byl jeden vodič od napájecího ATr přiveden na svorku 55 měřeného ATr a na svorky 56 a 58 příslušné žárovky. Ty byly následně připojeny na „kostru motocyklu“, kterou představoval druhý vodič od napájecího ATr. Pro ověření dílčích částí experimentu byla „kostra“ odpojována dle potřeby, aby bylo možné simulovat poruchu jedné nebo druhé žárovky.

K měření byl dále použit čtyřkanálový osciloskop s dvojicí napěťových a dvojicí proudových sond, jejichž orientace je ve schématu taktéž znázorněna. Nastavované napájecí napětí bylo snímáno za pomoci multimetru připojeného mezi svorku 55 a „kostru motocyklu“.



Obrázek 43 – Schéma měřicího obvodu ATr

Měřicí obvod respektuje zapojení světelného obvodu skutečného motocyklu. V porovnání s ním je měřicí obvod zjednodušený do té míry, že byl vynechán přepínač dálkového a potkávacího světla. Z toho důvodu měření probíhalo jen na jednom z vláken žárovky hlavního světlometu. Pro ověření funkce autotransformátoru je však toto zjednodušení přípustné. Simulovány byly následující tři provozní stavy:

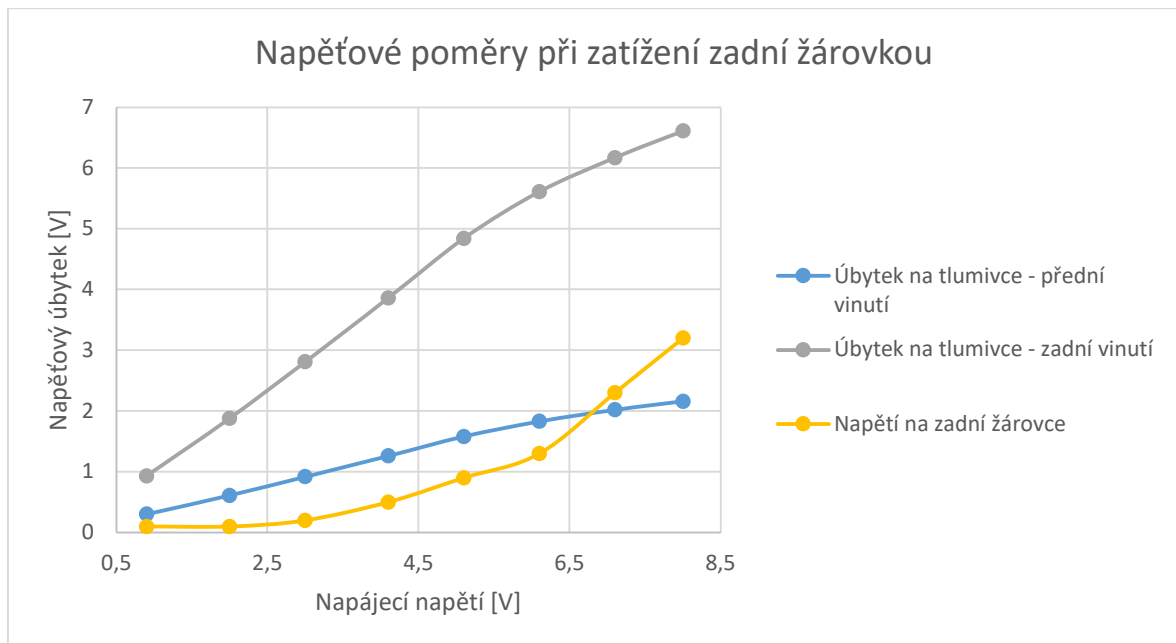
- zatížení zadním světlem 6 V / 5 W,
- zatížení předním světlem 6 V / 15 W,
- zatížení oběma žárovkami 5 + 15 W.

Prvním zkoumaným stavem bylo zatížení pouze zadním světlem. Tento stav může při provozu nastat nejčastěji při poruše přepínače světel hlavního světlometu a bez ochranného prvku vede k přetížení zadní žárovky. Testována jím tedy byla ochranná funkce pro zadní žárovku. Druhým testovaným stavem bylo zatížení pouze přední žárovkou, což simuluje již prasklou zadní žárovku 6 V / 5 W, tedy stav po konci životnosti zadní žárovky, nebo také následnou poruchu způsobenou jejím přetížením vycházejícím z prvního zkoumaného stavu. I v tomto případě byla testována ochranná funkce přechodem do režimu tlumivky. Posledním zkoumaným stavem bylo zatížení oběma žárovkami, které odkazuje na bezporuchový stav elektroinstalace motocyklu. Během tohoto měření byla ověřována funkce v režimu autotransformátoru a též jaké úbytky napětí vzniknou vložení autotransformátoru do světelného obvodu motocyklu v bezporuchovém stavu.

6.2.1 Zatížení zadním světlem 6 V / 5 W

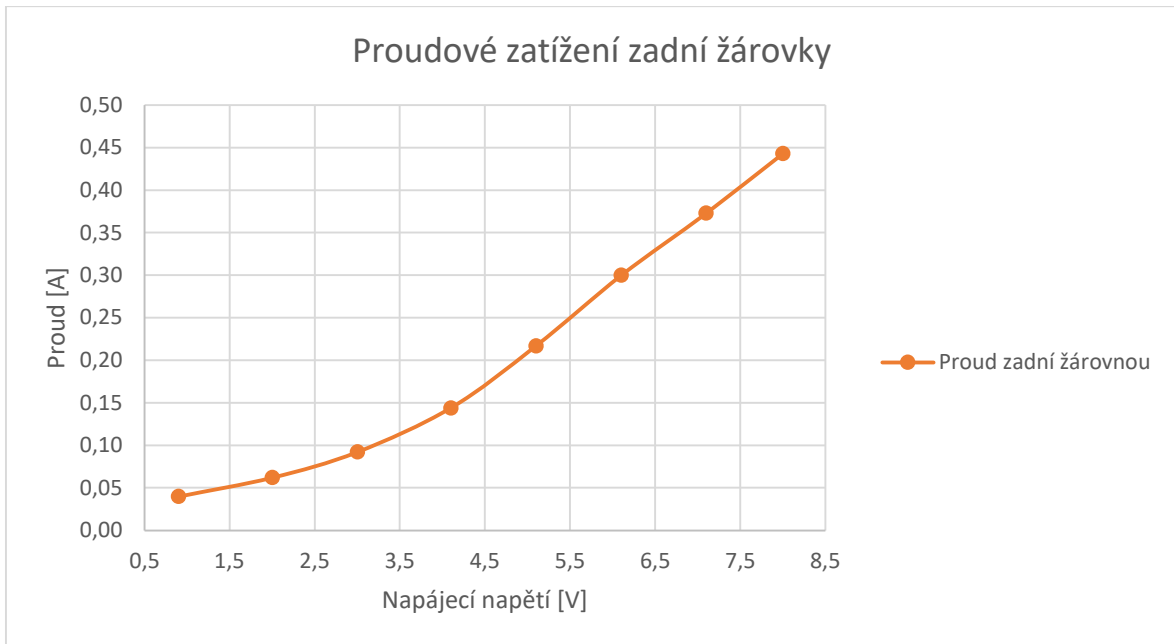
Tabulka 6: Zatížení zadním světlem

Zatížení zadním světlem				
U (V)	U_1 (V)	I_2 (A)	U_2 (V)	U_{z2} (V)
Napájecí napětí	Úbytek na tlumivce „přední vinutí“	Proud zadní žárovkou	Úbytek na tlumivce „zadní vinutí“	Napětí na zadní žárovce
0,9	0,301	0,0400	0,932	0,1
2,0	0,609	0,0621	1,880	0,1
3,0	0,919	0,0923	2,810	0,2
4,1	1,260	0,1440	3,860	0,5
5,1	1,580	0,2170	4,840	0,9
6,1	1,830	0,3000	5,610	1,3
7,1	2,020	0,3730	6,170	2,3
8,0	2,160	0,4430	6,610	3,2



Obrázek 44 – Napětové poměry při zatížení zadní žárovkou

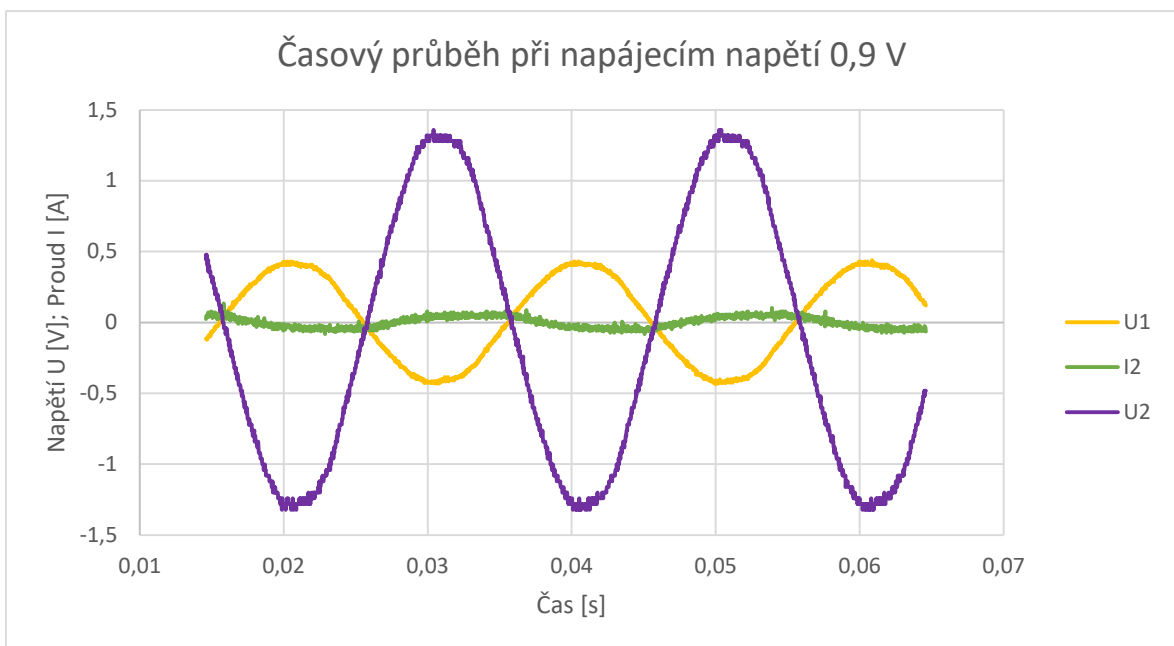
Z tabulky 6 a obrázku 44 je patrné, že ani při maximálních otáčkách motoru nedosahuje napětí na žárovce kritických hodnot pro životnost vlákna. Naměřená hodnota činila bezpečných 3,2 V. Ochranná funkce autotransformátoru byla potvrzena, neboť úspěšně přešel do režimu tlumivky. Průběh nárůstu proudu zadní žárovkou je znázorněn na obrázku 45. V tomto případě byla naměřena maximální hodnota 0,443 A.

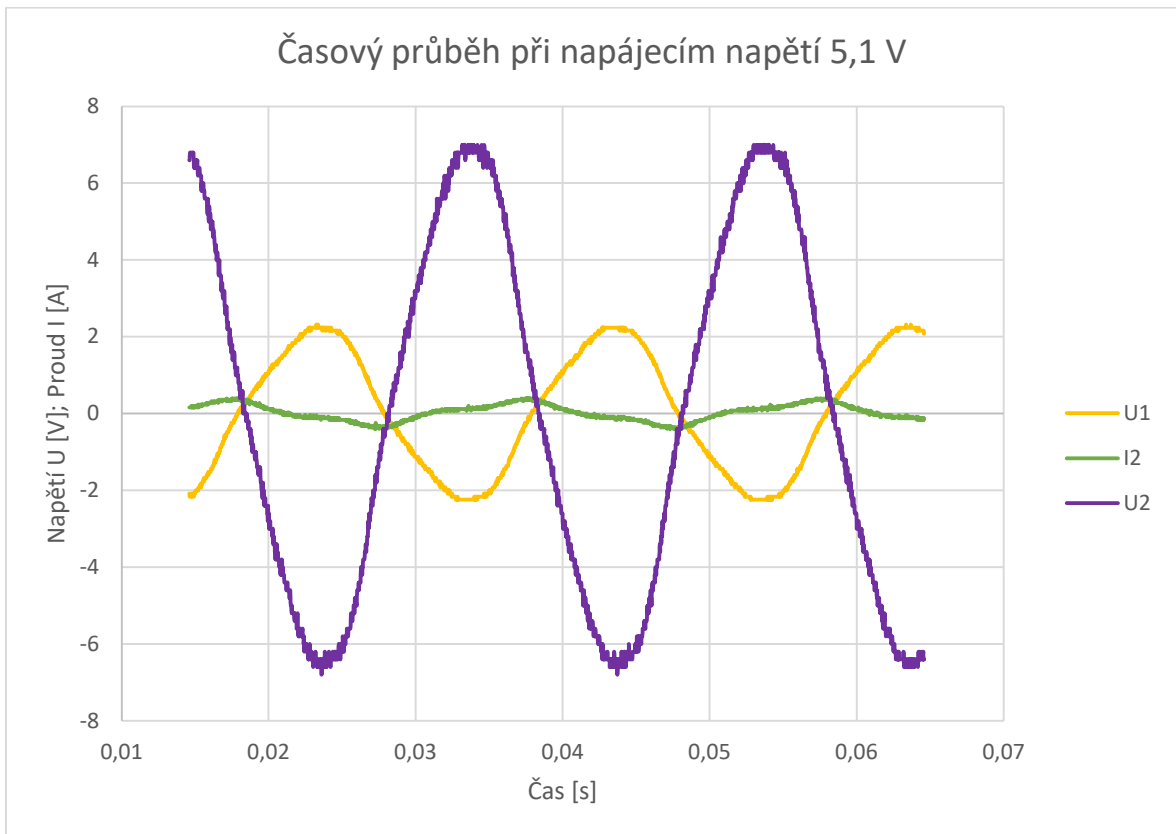


Obrázek 45 – Proudové zatížení zadní žárovky

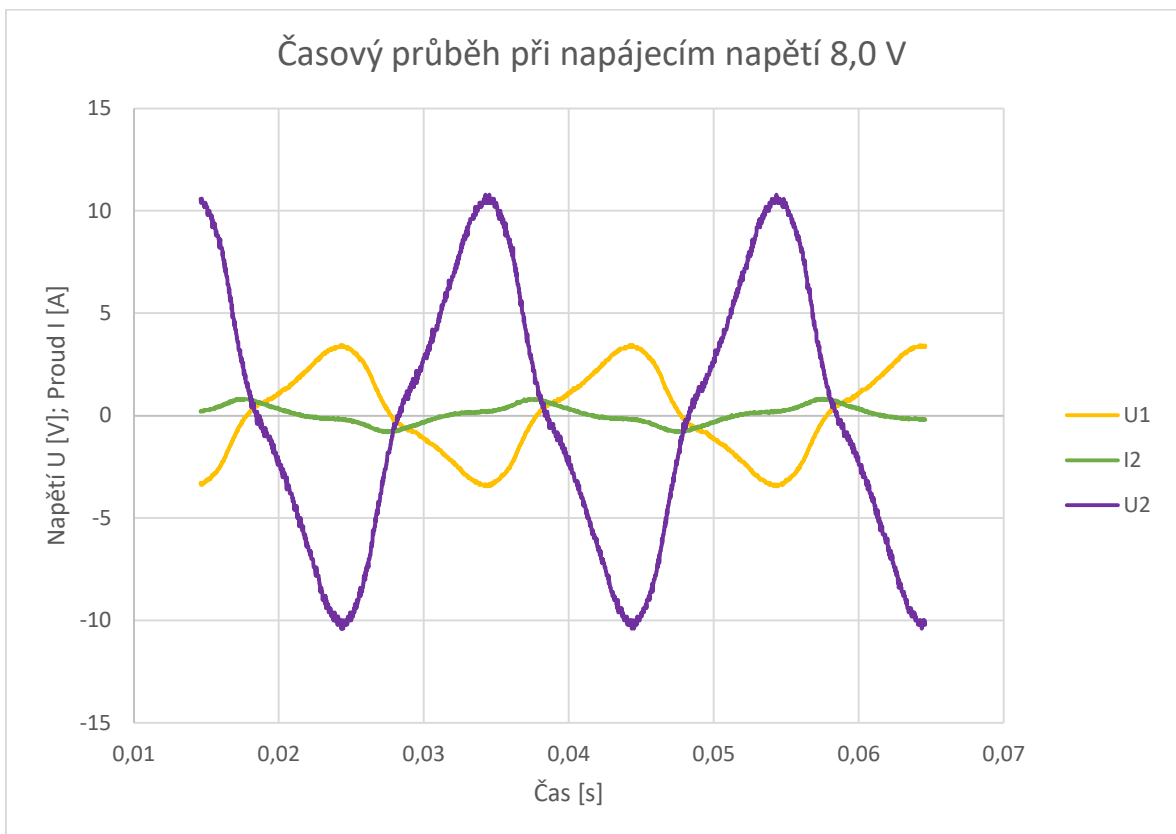
Výpočtem činného výkonu bylo zjištěno, že zadní žárovka je při maximálních otáčkách motoru zatěžována pouhými $1,42 \text{ W}$.

Z časových průběhů na obrázcích 46 až 48 je patrné, že s rostoucím napájecím napětím jsou průběhy stále více zkresleny a taktéž, že indukovaná napětí (potažmo úbytky) na vinutích jsou v protifázi, což je dáno smyslem vinutí. Dále je z průběhů zřejmé, že s rostoucím reaktančním úbytkem na vinutí zadní žárovky roste fázový posuv mezi napětím U_2 a proudem I_2 . Amplituda reaktančního úbytku U_2 dosáhla při napájecím napětí 8 V na hodnotu $10,8 \text{ V}$. Při napájecím napětí $6,1 \text{ V}$ na hodnotu $8,6 \text{ V}$.

Obrázek 46 – Časový průběh při napájecím napětí $0,9 \text{ V}$



Obrázek 47 – Časový průběh při napájecím napětí 5,1 V

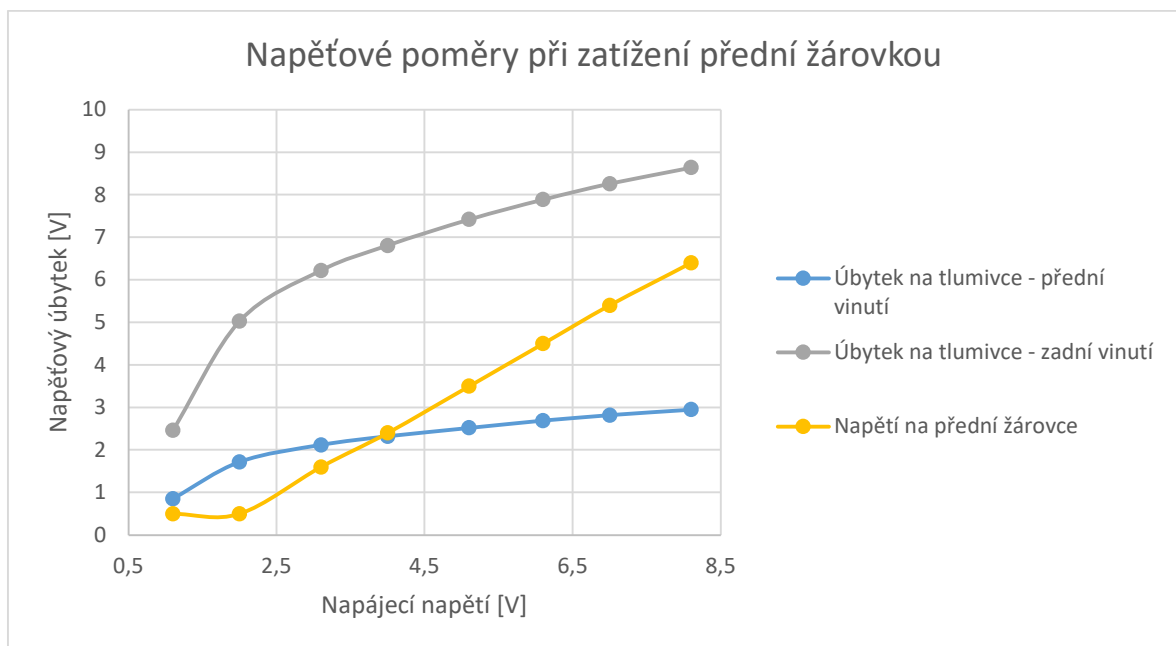


Obrázek 48 – Časový průběh při napájecím napětí 8,0 V

6.2.2 Zatížení předním světlem 6 V / 15 W

Tabulka 7: Zatížení předním světlem

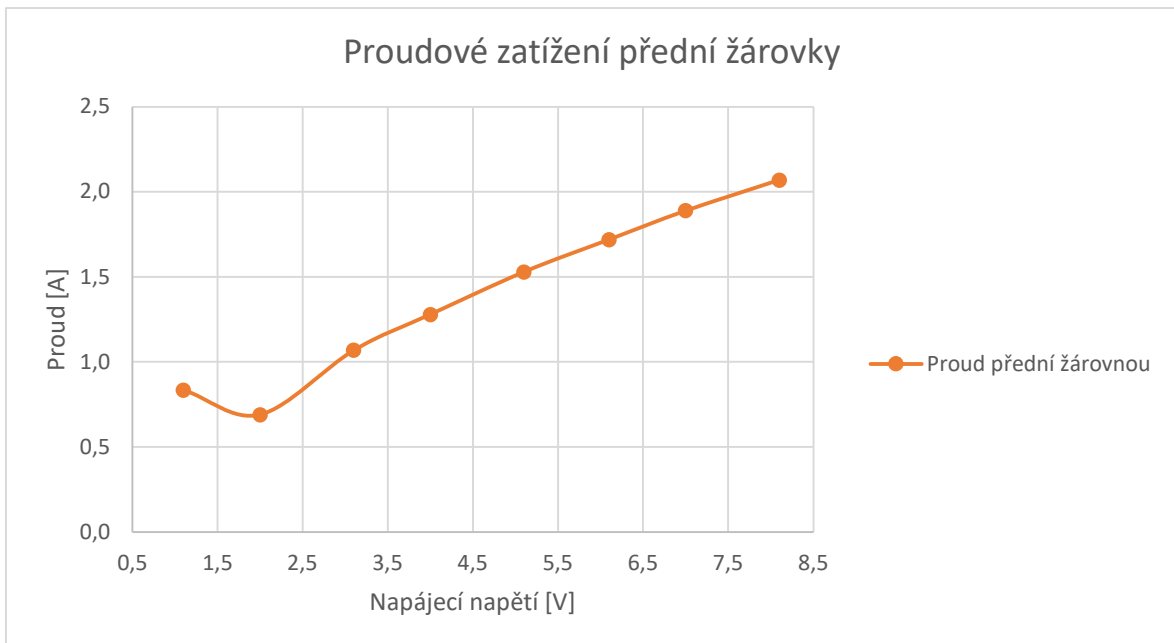
Zatížení přední lampou				
U (V)	U_1 (V)	I_1 (A)	U_2 (V)	U_{z1} (V)
Napájecí napětí	Úbytek na tlumivce „přední vinutí“	Proud přední žárovkou	Úbytek na tlumivce „zadní vinutí“	Napětí na přední žárovce
1,1	0,853	0,836	2,46	0,5
2,0	1,720	0,691	5,03	0,5
3,1	2,120	1,070	6,22	1,6
4,0	2,320	1,280	6,81	2,4
5,1	2,520	1,530	7,42	3,5
6,1	2,690	1,720	7,89	4,5
7,0	2,820	1,890	8,26	5,4
8,1	2,950	2,070	8,64	6,4



Obrázek 49 – Napěťové poměry při zatížení přední žárovkou

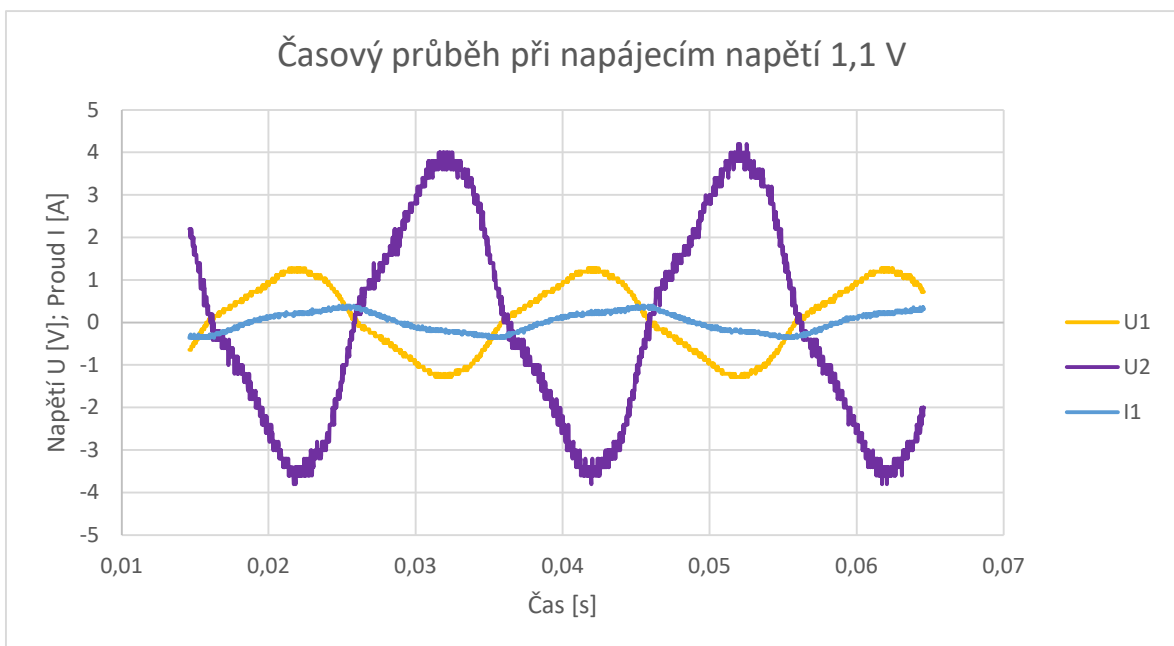
Z tabulky 7 a průběhů patrných z obrázku 49 plyne, že při zatížení přední žárovkou obvod při použití zkonstruovaného autotransformátoru úspěšně přechází do režimu tlumivky, jako v případě zatížení pouze zadní žárovkou. Při maximálních otáčkách motoru by bylo napětí na přední žárovce maximálně jmenovité, konkrétně 6,4 V. Ochranná funkce byla tedy i v tomto případě potvrzena. Průběh nárůstu proudu zadní žárovkou je znázorněn na obrázku 50. Byla naměřena maximální hodnota proudu žárovkou 2,07 A.

Výpočtem bylo zjištěno, že výkon dodávaný do přední žárovky při maximálních otáčkách motoru je $13,25 \text{ W}$. Ten plně dostačuje k dosažení dodatečné svítivosti předního světlometu a umožnil by jezdcům pokračovat v jízdě i za zhoršených světelných podmínek, tj. v noci.

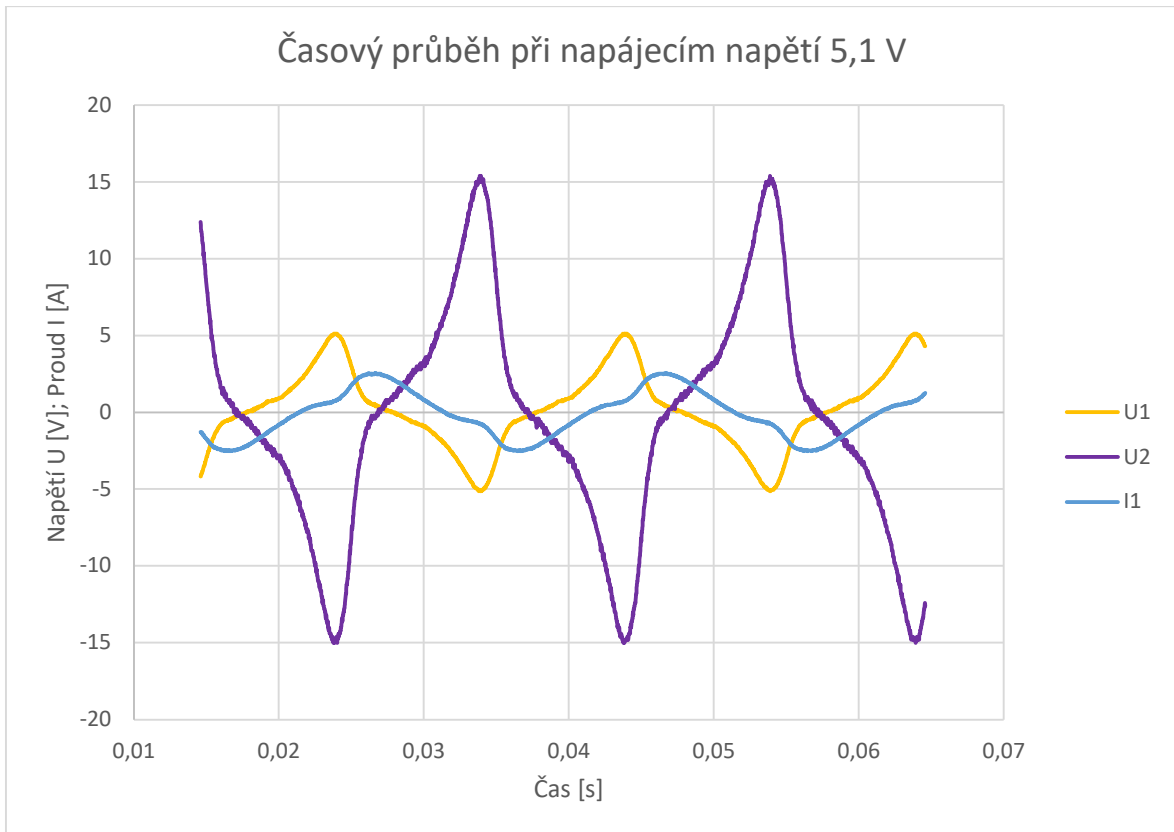


Obrázek 50 – Proudové zatížení přední žárovky

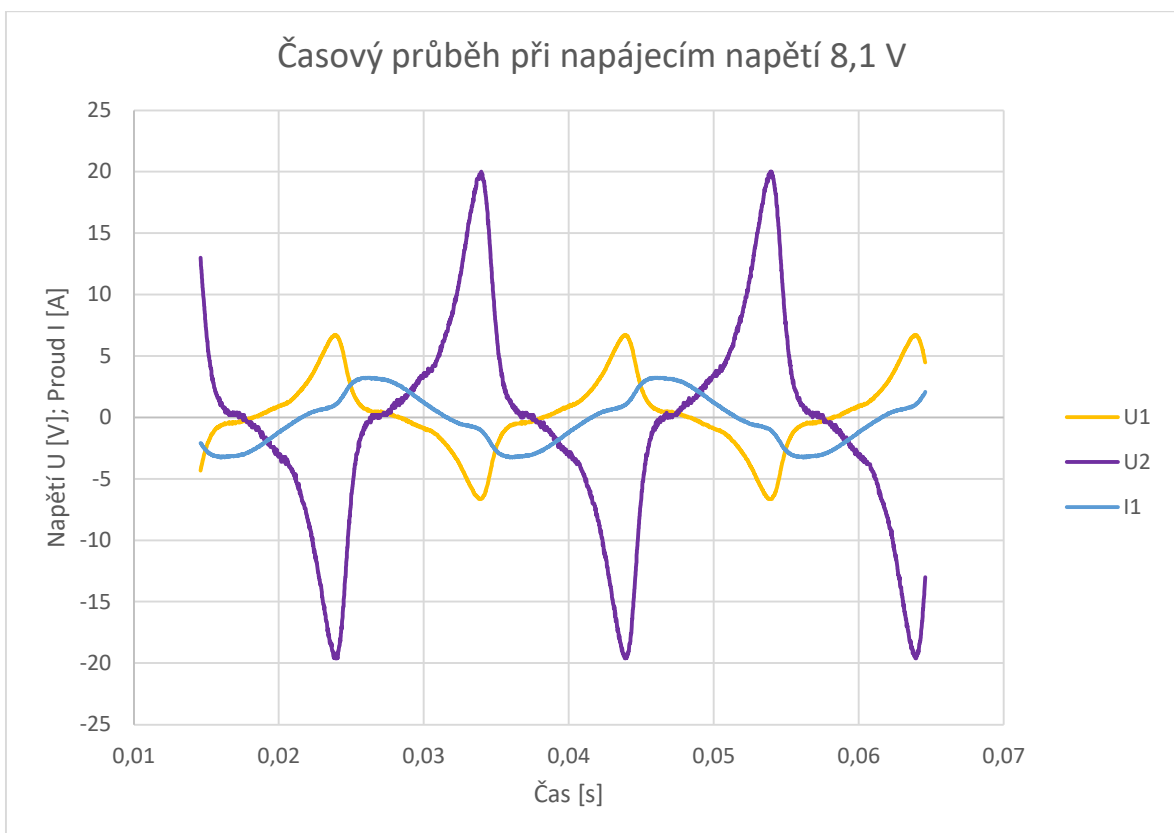
Z časových průběhů na *obrázcích 51 až 53* je patrné, že průběhy jsou zkreslené již od nízkých napájecích napětí a s jeho růstem jsou průběhy dále více zkreslovány. I v tomto případě platí, že s rostoucím reaktančním úbytkem na vinutí pro přední žárovku roste fázový posuv mezi napětím U_1 a proudem I_1 . Amplituda reaktančního úbytku U_1 dosáhla při napájecím napětí $8,1 \text{ V}$ hodnoty $6,72 \text{ V}$ a při napájecím napětí $6,1 \text{ V}$ hodnoty $5,76 \text{ V}$.



Obrázek 51 – Časový průběh při napájecím napětí 1,1 V



Obrázek 52 – Časový průběh při napájecím napětí 5,1 V

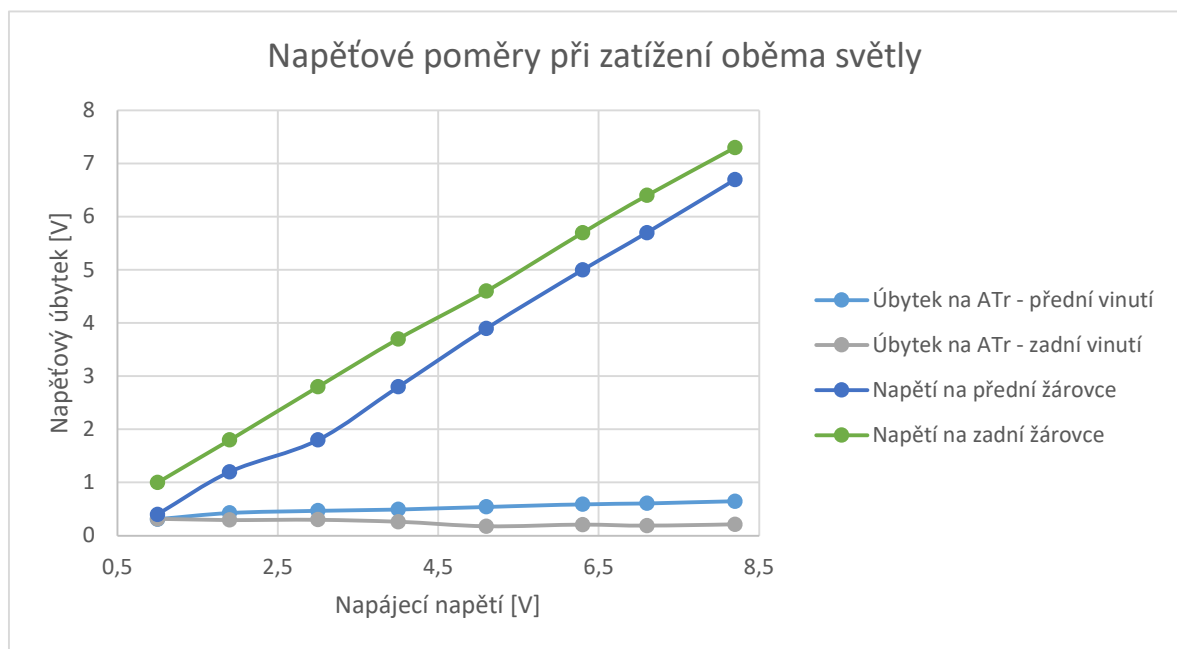


Obrázek 53 – Časový průběh při napájecím napětí 8,1 V

6.2.3 Zatížení zadním světlem 6 V / 5 W a současně předním 6 V / 15 W

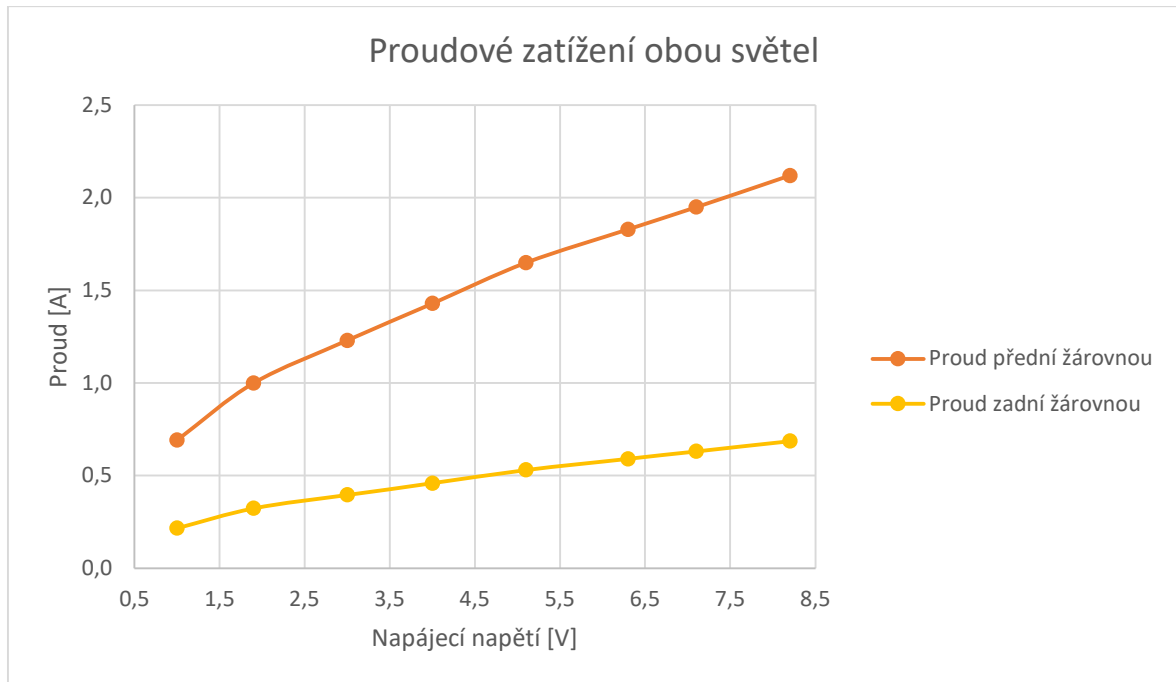
Tabulka 8: Zatížení oběma světly

Zatížení oběma světly						
U (V)	U ₁ (V)	I ₁ (A)	U ₂ (V)	I ₂ (A)	U _{z1} (V)	U _{z2} (V)
Napájecí napětí	Úbytek na ATr „přední vinutí“	Proud přední žárovkou	Úbytek na ATr „zadní vinutí“	Proud zadní žárovkou	Napětí na přední žárovce	Napětí na zadní žárovce
1,0	0,308	0,6920	0,315	0,217	0,4	1,0
1,9	0,426	1,0000	0,294	0,324	1,2	1,8
3,0	0,469	1,2300	0,301	0,396	1,8	2,8
4,0	0,493	1,4300	0,263	0,459	2,8	3,7
5,1	0,542	1,6500	0,178	0,531	3,9	4,6
6,3	0,590	1,8300	0,208	0,591	5,0	5,7
7,1	0,608	1,9500	0,188	0,631	5,7	6,4
8,2	0,648	2,1200	0,213	0,687	6,7	7,3



Obrázek 54 – Napěťové poměry při zatížení oběma světly

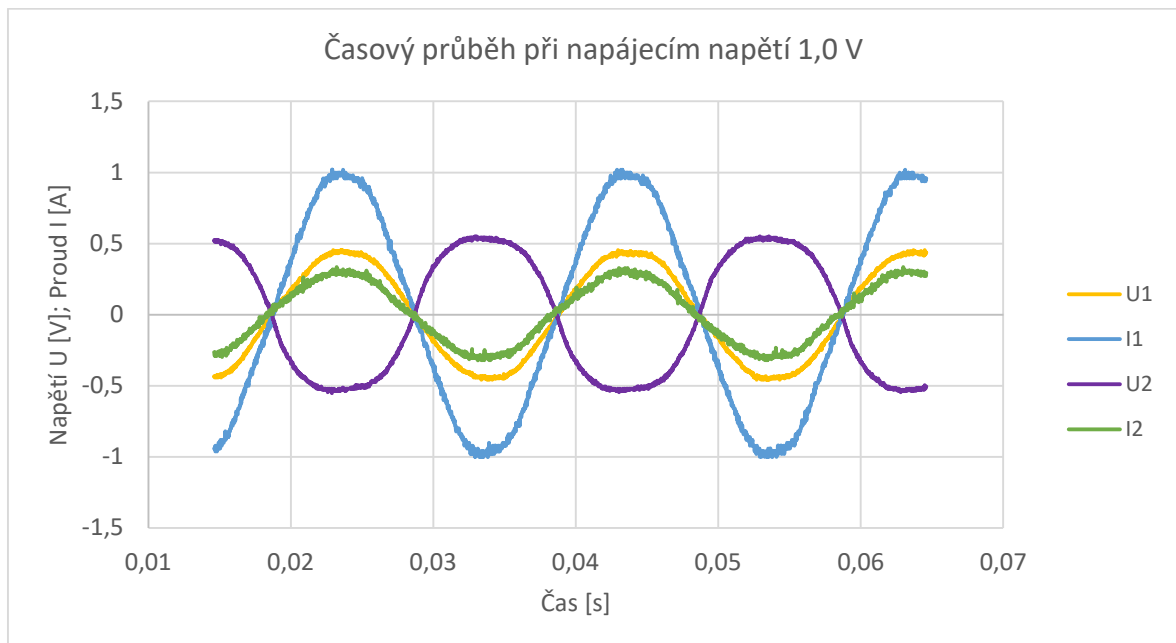
Z tabulky 8 a průběhů z obrázku 54 plyne, že při bezporuchovém stavu obou žárovek ATr obvod světelných prakticky nijak neovlivňuje. Vznikají pouze malé napěťové úbytky na reálném odporu každého vinutí. Tyto úbytky (0,65 V a 0,21 V) mírně snižují napájecí napětí žárovek oproti stavu bez autotransformátoru. Na obou žárovkách je tedy napětí téměř shodné s napětím magnetu.



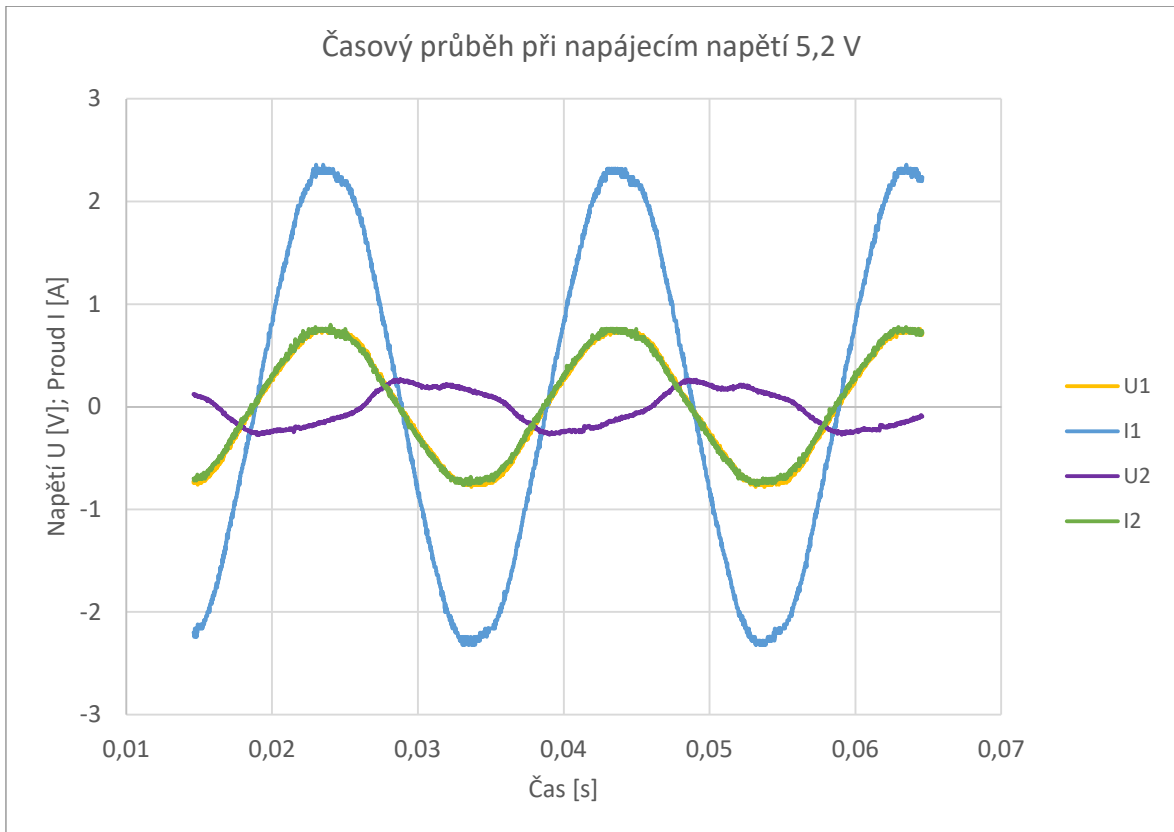
Obrázek 55 – Proudové zatížení obou světel

Výpočtem činného výkonu vychází, že při maximálních otáčkách motoru je do přední žárovky dodáván výkon $15,48\text{ W}$. Zadní žárovce je dodáván výkon $4,6\text{ W}$.

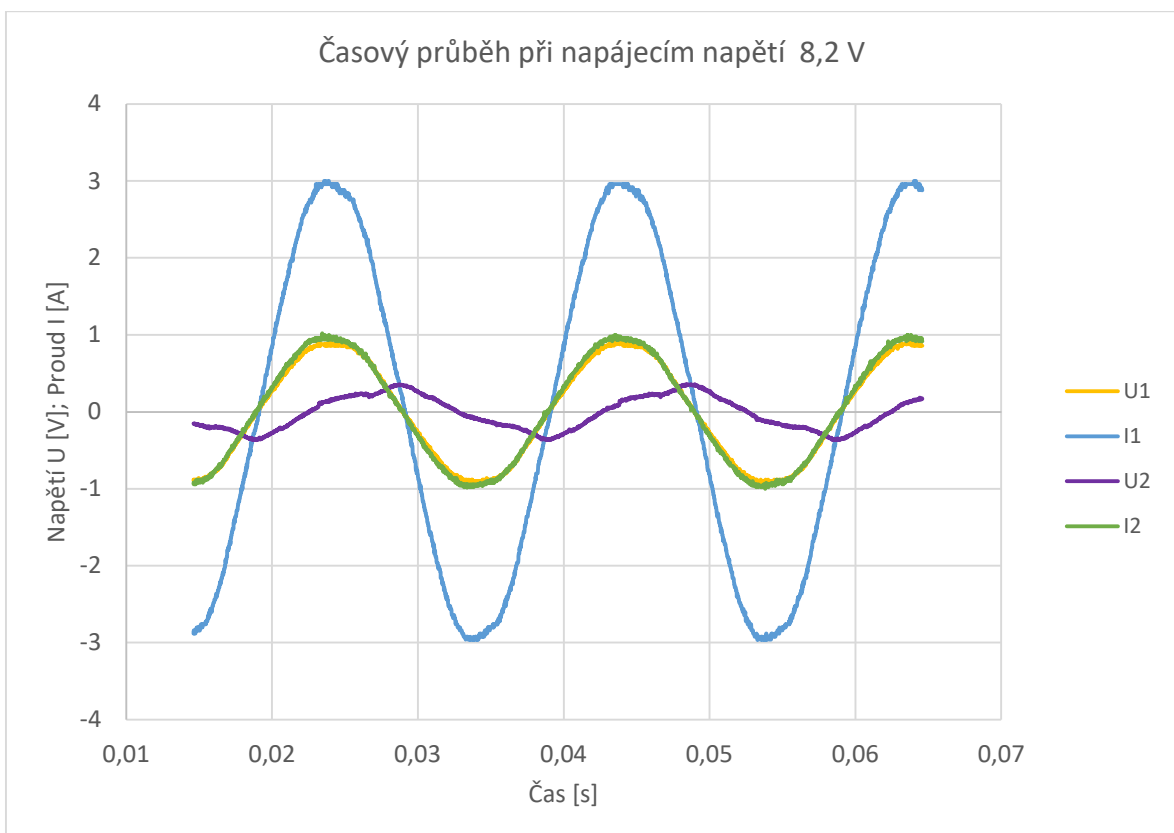
Z časových průběhů na *obrázcích 56 až 58* je patrné, že na vinutí pro přední světlo nevzniká žádný reaktanční úbytek. Napětí U_1 a proud I_1 jsou ve fázi v celém napěťovém rozsahu. Oproti tomu na vinutí pro zadní světlo začne s rostoucím napájecím napětím docházet ke zkreslení průběhu a fázovému posuvu. Ten je způsoben částečným přechodem do tlumivkového režimu. Magnetické toky zjevně nejsou zcela vyrovnány.



Obrázek 56 – Časový průběh při napájecím napětí 1,0 V



Obrázek 57 – Časový průběh při napájecím napětí 5,2 V



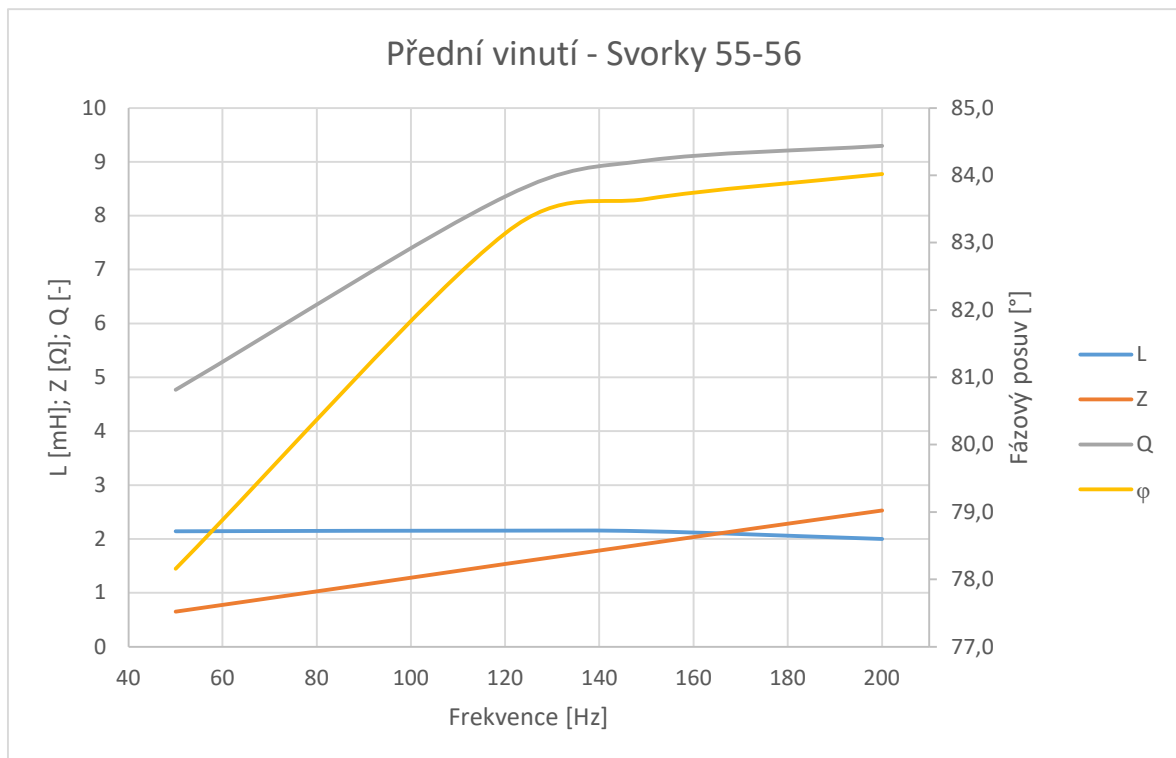
Obrázek 58 – Časový průběh při napájecím napětí 8,2 V

6.3 Měření parametrů ATr

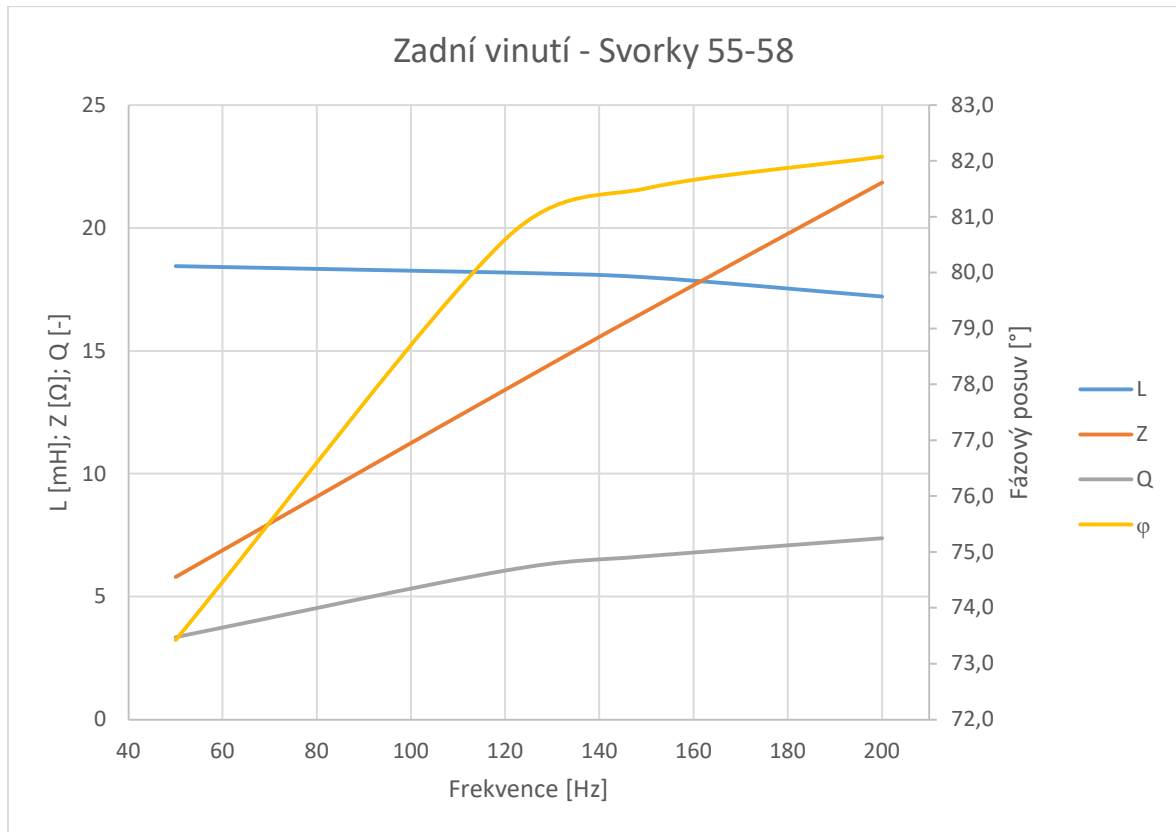
Po zhotovení ATr byly ověřeny jeho parametry za pomoci LCR můstku KUST LM1010 A. Měření bylo provedeno při frekvencích 50 Hz, 120 Hz, 150 Hz a 200 Hz při napětí 50 mV. Byly změřeny parametry jednotlivých vinutí a jejich sériové kombinaci.

Tabulka 9: Měření parametrů ATr

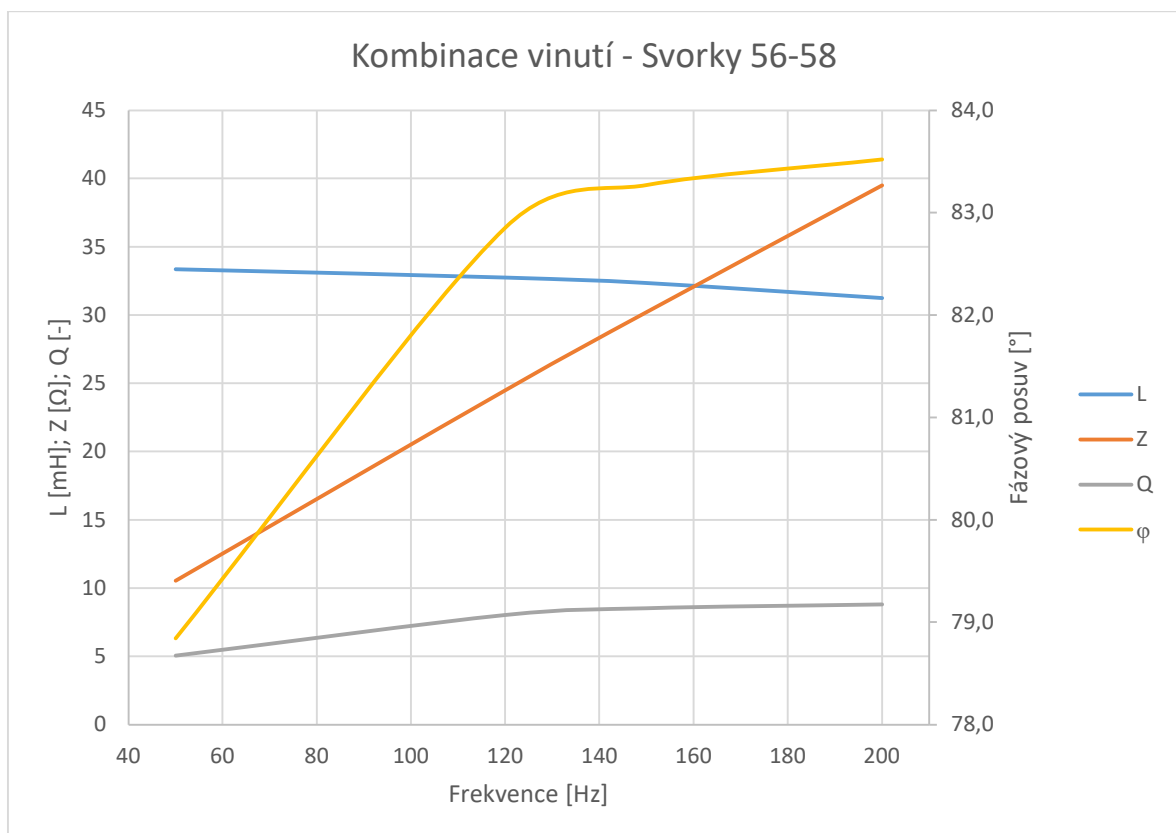
		50 Hz / 50 mV	120 Hz / 50 mV	150 Hz / 50 mV	200 Hz / 50 mV
Přední vinutí Svorky 55-56	L [mH]	2,1458	2,1562	2,1456	2,0032
	R [mΩ]	122,4900	122,4900	122,4900	122,2800
	Z [Ω]	0,6513	1,5358	1,9113	2,5326
	Q [-]	4,7721	8,3598	9,0233	9,2984
	φ [°]	78,1610	83,1430	83,6510	84,0216
Zadní vinutí Svorky 55-58	L [mH]	18,4490	18,1860	17,9980	17,2210
	R [mΩ]	1,4174	1,4174	1,4174	1,1469
	Z [Ω]	5,8053	13,4270	16,6350	21,8540
	Q [-]	3,3566	6,0687	6,6461	7,3781
	φ [°]	73,4260	80,5980	81,5100	82,0780
Kombinace vinutí Svorky 56-58	L [mH]	33,3710	32,7480	32,3520	31,2540
	R [mΩ]	1,5454	1,5454	1,5454	1,5328
	Z [Ω]	10,5520	24,4910	30,2260	39,5050
	Q [-]	5,0661	8,0265	8,5349	8,8053
	φ [°]	78,8440	82,8540	83,2690	83,5200



Obrázek 59 – Frekvenční závislost parametrů předního vinutí



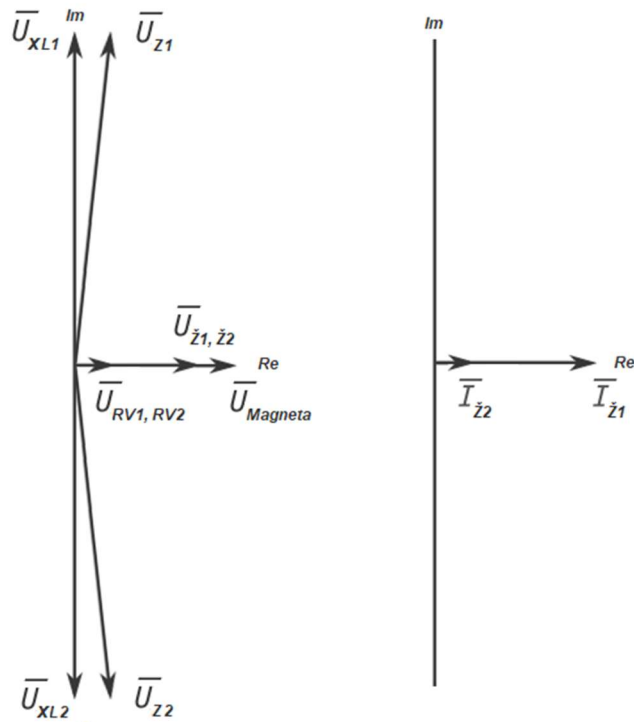
Obrázek 60 – Frekvenční závislost parametrů zadního vinutí



Obrázek 61 – Frekvenční závislost parametrů kombinace vinutí

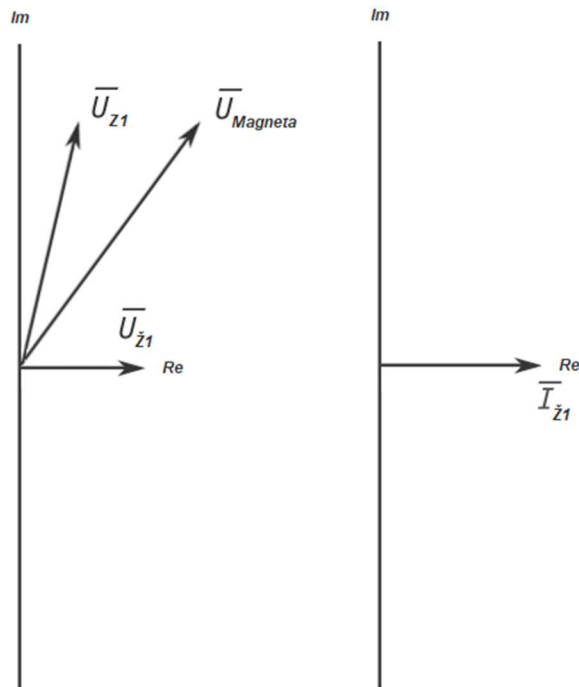
6.4 Fázorový diagram

6.4.1 Bezporuchový stav – režim autotransfornátor



Obrázek 62 – Fázorový diagram v režimu autotransfornátor

6.4.2 Stav s poruchou – režim tlumivka



Obrázek 63 – Fázorový diagram v režimu tlumivka

Závěr

V předložené práci byl kromě vysvětlení principu činnosti autotransformátoru navrhnut speciální autotransformátor pro ochranu žárovek v elektroinstalaci motocyklů Jawa 550 a Jawa 555. Návrh spočíval nejen v samotných výpočtech požadovaných elektrických vlastností, ale i konceptu mechanické konstrukce jednotlivých komponent a navíjecího přípravku. Navržena byla skládaná kostra patřičných rozměrů odvíjejících se od vypočtené plochy středního sloupku magnetického obvodu. Jeho rozměr byl volen s ohledem na omezený zástavbový prostor motocyklu a originální tlumivku světelného obvodu, pro niž bylo cílem vytvořit adekvátní náhradu. Výsledkem návrhu je vinutý díl, který je schopen přeházet mezi funkčními režimy autotransformátor a tlumivka v závislosti na situaci ve světelném obvodu.

Z hlediska mechanické konstrukce byl kladen velký důraz na vzhled ATr. To však přineslo do návrhu konstrukce mnohé komplikace, které by značně znesnadňovaly manuální výrobu většího počtu kusů, a to především z hlediska pracnosti výroby jednotlivých komponent, časové náročnosti a ceny. Nejnáročnější komponentou byla sestava třmenu a svorkovnice. Oproti tomu navíjecí trn a kostra jsou zkonstruovány s důrazem na nízkou výrobní cenu a cenu materiálu. Důsledkem požadavku nízké výrobní ceny navíjecího trnu je zvolení FDM technologie 3D tisku. Nevýhodou tohoto rozhodnutí je, že by navíjecí trn pravděpodobně nevydržel větší výrobní sérii.

V případě sériové výroby by se výrazně vyplatilo přepracovat přířezy skládané kostry tak, aby nebylo zapotřebí čela navíjecí komory nijak fixovat, případně rovnou použít standardizovanou kostru. To by ale mohlo znamenat, že daný rozměr pro požadovanou výšku balení transformátorových plechů nebude dostupný, což by vyústilo v potřebu přepočítat obě vinutí. Taktéž třmen se svorkovnicí by bylo pro sériovou výrobu vhodné přepracovat. Jednou z možností by bylo navrhnout třmen, jehož geneze by byla možná formou tisku na 3D tiskárně technologií FDM. Svorkovnice by pak v takovém případě mohla být zkonstruována takovým způsobem, aby bylo možno použít klasické automobilové násuvné konektory Faston 6,3 mm, čímž by došlo ke značnému poklesu finančních nároků výrobku.

Z měření vlastností zkonstruovaného speciálního autotransformátoru vyplynulo, že je jeho použití je zcela ideálním řešením. V bezporuchovém stavu jsou na vinutí přijatelně nízké napěťové úbytky tvořené odpory vinutí. Tyto napěťové úbytky mírně snižují napájecí

napětí žárovek a mají velikost $0,65 V$ pro žárovku předního a $0,21 V$ pro žárovku zadního světlometu motocyklu.

V případě poruchy kdekoli ve světelném obvodu je oběma žárovkám poskytována spolehlivá ochrana přechodem do režimu tlumivky. V pracovním režimu tlumivky dochází ke vzniku reaktančních úbytků vznikajících na příslušných vinutích. Tyto úbytky mohou začít vznikat z důvodu zániku proudu do přerušené větve obvodu a tím zániku příslušného magnetického toku v magnetickém obvodu. V důsledku jeho zániku již není dostatečně kompenzován druhý tok a na vinutí do nepřerušené větve může vzniknout příslušný reaktanční napěťový úbytek; ten má v případě ochrany zadní žárovky velikost $6,61 V$ a v případě přední žárovky $2,95 V$. Oba napěťové úbytky jsou dostatečné k tomu, aby byly žárovky v případě poruchy spolehlivě ochráněny před přepětím vzniklým nezátíženým alternátorem – magnetem.

Magnetické toky při režimu autotransformátor se zcela nerovnájí. Tento jev má za následek fakt, že i v tomto režimu pracuje díl částečně jako tlumivka. Vyplývá to z časových průběhů, kdy v části obvodu pro zadní světlo dochází ke zkreslení signálu a fázovému posuvu. Část obvodu pro přední žárovku vykazuje průběhy napětí a proudu v tomto režimu nezakreslené a ve fázi v celém napěťovém rozsahu.

V současnosti by se jako vhodnější řešení celé problematiky nabízelo zkonstruovat moderní elektronickou ochranu žárovek či dokonce použít běžně dostupný omezovač napětí [19]. Při lpění na úpravě poplatné době by bylo možno použít zapalování z motocyklu Jawa 05 a mladších. Přepřacované magneto má již pro každou část světelného obvodu vlastní vinutí. Další možností je použít moderní bezkontaktní náhradu zapalování od firmy VAPE [20]. To však trpí stejným nedostatkem z hlediska přítomnosti přepěťových stavů světelného obvodu jako původní magneto pro Jawu 555, tudíž se bez vhodného ochranného prvku či omezovače přepětí neobejde.

Na samotný závěr je tedy možno konstatovat, že všechny cíle této diplomové práce byly naplněny s velmi uspokojivým výsledkem a výstup práce lze využít v praxi, zejména při renovaci historických motocyklů z produkce domácí firmy Jawa, která je nejstarší dosud fungující československou společností v tomto odvětví.

Literatura

- [1] JOZIF, Josef. *Motocykl Jawa 50 Pionýr*. Vydání I. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959. 124 stran
- [2] POVAŽSKÉ STROJÍRNY. *Dielenská příručka – ľahký motocykel Jawa 50*. Vydání I. Považská Bystrica: Obchodno-technické služby Považské strojarne, 1959. 44 stran
- [3] Jawa-50. *Elektroinstalace – změny v průběhu výroby*. [online]. 12.10.2018. [cit. 18.3.2023]. Dostupné z: <https://www.jawa-50.cz/clanek/elektroinstalace-zmeny-v-prubehu-vyroby.html>
- [4] ProfiElektrika.cz. *Autotransformátor* [online]. 17.08.2008 [cit. 29.4.2023]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/autotransformator?fbclid=IwAR2jj7WTcFDMVcnpPDB797zroWyQg3nJh4nr8MkrPmAtPZ7Zc9kprdm2Erc>
- [5] Wikipedie: Otevřená encyklopedie. *Autotransformátor*. [online]. [cit. 29.4.2023]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Autotransform%C3%A1tor?fbclid=IwAR3ltp3yCVYsK4EsM6REiHan1M0nf03HXlgnIBnrdCDGM5M_D2y1te4oqJE
- [6] Výukový portál SPŠ, SOŠ a SOU HK. *Autoransformátor* [online]. 12.10.2018. [cit. 29.4.2023]. Dostupné z: https://vyuka.hradebni.cz/file.php/224/ESP_-_transformatory/T-7-Autotransformator.pdf
- [7] Waasner. *EI & WEI KERBLECHE*. Produktkatalog [online]. Forchheim, 2022 [cit. 20.3.2023]. Dostupné z: <https://www.waasner.de/produkte/transformatoren/#>
- [8] Výukový portál SPŠ, SOŠ a SOU HK. *Transformátory* [online]. 12.10.2018. [cit. 18.3.2023]. Dostupné z: https://vyuka.hradebni.cz/file.php/42/Vyuka/Slaboproud/PDF_soubory/01_Od_zacatku_kurzu/7_4_Transformatory.pdf
- [9] Seipp. *Isolierschlauch Lack-Glasseide ILGFE 9* [online]. 2023 [cit. 22.3.2023]. Dostupné z: <https://shop.seipp-gmbh.de/products/lack-glasseideschlauch?variant=30207672967>
- [10] 3mcesko. *Polyesterové pásky*. 3M™ ET 1350F polyesterová izolační páska [online]. 2023. [cit. 18.3.2023]. Dostupné z: https://www.3mcesko.cz/3M/cs_CZ/p/d/b00034583/
- [11] 3mcesko. *Pásky ze skelné tkaniny*. 3M™ Páska 69 ze skelné tkaniny [online]. 2023 [cit. 23.3.2023]. Dostupné z: https://www.3mcesko.cz/3M/cs_CZ/p/d/b5005036025/

- [12] Axalta. *Impregnants*. Voltatex® 4001 [online]. 03.2023. [cit. 18.3.2023]. Dostupné z: https://www.axalta.com/electricalinsulation_global/en_US/impregnating-resins/product-catalog/Voltatex-4001.html
- [13] Elantas Electrical Insulation. *Elmotherm® FS 190* [online]. San Martino: Elantas, 06.2015. [cit. 18.3.2023]. Dostupné z: https://products.elantas.com/beckinsulation/productReport/Elmotherm%C2%AE_FS_190_oxidrot.pdf?language=de&country=&download=productReport&productid=00000143&brandid=6695
- [14] TPC. *Design system - Graphic* [online] 2023. [cit. 23.3.2023]. Dostupné z: <http://www.tpc.sk/support/software/design-system-graphic>
- [15] TPC. *Navijačka ERN 22* [online] 2023. [cit. 23.3.2023]. Dostupné z: <http://www.tpc.sk/sk/produkty-sk/navijacky-stolove/ern-22>
- [16] TPC. *Odvijacie zariadenia* [online] 2023. [cit. 24.3.2023]. Dostupné z: <http://www.tpc.sk/sk/produkty-sk/prislusenstvo/odvijacie-zariadenia>
- [17] Performance-coatings. *Herberts® Electro 1K Impregnating Varnishes and Resins* [online] 13.05.2001. [cit. 27.3.2023]. Dostupné z: <https://www.performance-coatings.org/en/industrial-coatings/ct-he-pi-1k-impregnating-varnishes.htm>
- [18] Mueller-ahlhorn. *Přehled tříd izolace* [online] 2022. [cit. 27.3.2023]. Dostupné z: <https://www.mueller-ahlhorn.com/cs/P%C5%99ehled-t%C5%99%C3%ADd-izolace/>
- [19] VAPE. *OMEZOVAČ NAPĚTÍ 6V* [online] 2023. [cit. 31.3.2023]. Dostupné z: <https://eshop.vape.cz/cs/omezovac-napeti-6v-60bab601907040>
- [20] VAPE. *SOUPRAVA ZAPALOVÁNÍ - SZ86* [online] 2023. [cit. 31.3.2023]. Dostupné z: <https://eshop.vape.cz/cs/souprava-zapalovani-sz86-a-sz86>
- [21] MIKULČÁK, Jiří. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: Protheus, 1988. ISBN 978-80-7196-345-5.