

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromagnetického pole



Diplomová práce

Snímač pro měření elektrického proudu kolejnicí

Sensor for Measuring Electric Current in Rail

Květen 2021

Vypracoval:

Bc. Jonáš Kubát

Vedoucí práce:

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem práci *Snímač pro měření elektrického proudu kolejnicí* vypracoval samostatně a všechny zdroje použité při zpracování této práce uvedl v seznamu literatury.

V Praze dne 14. května 2021

.....

Podpis

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kubát** Jméno: **Jonáš** Osobní číslo: **466258**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Snímač pro měření elektrického proudu kolejnicí

Název diplomové práce anglicky:

Sensor for Measuring Electric Current by Rail

Pokyny pro vypracování:

Provedte analýzu magnetického pole indukovaného v okolí kolejnice protékané proudem pomocí 2D FEM modelu, např. v aplikaci ANSYS Maxwell. Posuďte možnost měření proudu kolejnicí na základě analyzovaného magnetického pole v jejím okolí, a to pomocí vhodně umístěné Hallovovy sondy včetně případného magnetického obvodu nebo pomocí vzduchové cívky. Snímací část (senzor i magnetický obvod) nesmí zasahovat nad temeno kolejnice, aby mohla být během měření pojížděna. Zvolené řešení po konzultaci s vedoucím práce realizujte a na funkčním vzorku měřením zjistěte a zhodnoťte dosažené parametry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Haasz, V. a kol.: Elektrická měření. Přístroje a metody (3. přepracované vydání). Monografie ČVUT, Česká technika - nakladatelství ČVUT, Praha 2018, ISBN: 9788001064122
[2] Bartušek, K.: Měření v elektrotechnice (2., přepracované a doplněné vydání), Brno, VUTIUM, 2010, ISBN: 9788021441606 Mayer, A.: Aplikovaný elektromagnetismus (2. vydání), České Budějovice, Kopp, 2012, ISBN: 9788072324361

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka, katedra teorie obvodů FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **03.02.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2022**

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji všem lidem za to, že jsou a dělají tento svět lepším. Děkuji přírodě za to, že tu je, a dělá tento svět krásnějším. Děkuji všem, kteří mají v životě velké sny, že si za nimi jdou, i těm, kteří si život maximálně užívají a inspirují tím ostatní. Děkuji Ing. Jaroslavu Plešingerovi z Techsoft Engineering za podporu při simulacích v prostředí Ansys Maxwell a Ing. Patriku Matouškovi z AŽD Praha za možnost diskutovat navrhovaná řešení s ohledem na použitelnost v praxi. A samozřejmě také vedoucímu práce doc. Dr. Ing. Jiřímu Hospodkovi, že mě navedl na nejbližší funkční cestu, když jsem přišel s až moc šíleným nápadem.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem a realizací Snímače pro měření elektrického proudu kolejnicí pro kolejovou část systémů LVZ. První 2 kapitoly práce shrnují relevantní principy vlakového zabezpečení a definují požadované vlastnosti senzoru. 3. část se zabývá rešerší metod snímání proudu a jejich použitelností pro tento účel snímání. Ve 4. části jsou provedeny optimalizace a simulace jednotlivých konfigurací v prostředí Ansys Maxwell 3D, přičemž největší pozornost je věnována indukční cívice s ocelovým jádrem. Poslední část popisuje realizaci navrženého senzoru včetně testování jeho vlastností. Závěrem jsou shrnuty dosažené parametry.

Klíčová slova: Měření proudu, vlakové zabezpečení, ANSYS Maxwell 3D, FEM simulace

ABSTRACT

This thesis is about design and realisation of Sensor for measuring electric current in rail for stationary part of railway section-security systems. First 2 chapters summarise relevant principles of railway security systems and define required parameters of the sensor. The 3rd part reviews methods of current sensing and their usability for this purpose. In the 4th part optimisation and simulation of each configuration is done using Ansys Maxwell 3D environment, while the greatest attention is given to induction coil with steel core. Last part describes realisation of designed sensor including testing of its properties. In conclusion are summarised achieved parameters.

Key words: Current sensing, railway security, ANSYS Maxwell 3D, FEM simulation

OBSAH

1. Principy vlakového zabezpečení	9
2. Vlastnosti senzoru.....	11
3. Principy měření proudu.....	12
3.1 Odporové (bočník)	12
3.2 Proudový transformátor.....	13
3.3 Vzduchová indukční cívka.....	14
3.4 Indukční cívka s ocelovým jádrem	16
3.5 Rogowského cívka	16
3.6 Hallova sonda.....	17
3.7 Magnetorezistor.....	18
3.8 Shrnutí	19
4. Simulace indukční cívky s ocelovým jádrem	20
4.1 Výběr simulačního programu	20
4.2 Nastavení simulace	21
4.3 Simulace tloušťky jádra	24
4.4 Simulace šířky jádra	26
4.5 Simulace délky jádra	27
4.6 Simulace délky pólových nástavců	28
4.7 Simulace přimknutých tvarů.....	28
4.8 Simulace dalších konfigurací.....	28
4.8.1 Vlakový senzor pro porovnání	28
4.8.2 Uzavřené jádro skrz hlavu	29
4.8.3 Uzavřené jádro skrz otvor	29
4.8.4 Boční jádro.....	29
4.8.5 Vzduchová cívka.....	29
4.8.6 Proudový transformátor.....	30
4.8.7 Uzavřené jádro kolem celé kolejnice	31
4.9 Vylepšení univerzálního tvaru.....	32
4.10 Sycení jádra a závislost na frekvenci	32

5. Stavba a měření	34
5.1 Měření na traverze a porovnání se simulací	34
5.2 Návrh finálního tvaru pro výrobu	35
5.3 Návrh kostry cívky, 3D tisk a navíjení	35
5.4 Měření prototypu a úpravy	35
5.5 Návrh krytu	37
5.6 Měření na dráze	37
6. Závěr	37
Použitá literatura	38
Zdroje obrázků	39

1. PRINCIPY VLAKOVÉHO ZABEZPEČENÍ

Vlakový zabezpečovač slouží ke zjištění přítomnosti vlaků v jednotlivých úsecích a případně také předává strojvedoucímu informaci o stavu následujícího návěstidla. Dělí se na bodové a liniové.

Bodové detekují průjezd vlaku a přenášejí stav návěstidla jen v jednom místě. Díky tomu:

- + Je známa přesná vzdálenost k návěstidlu
- Nepřenáší změny na návěstidle

Nejmodernějším zabezpečením je v Evropě systém ETCS (*European Train Control System*), jehož součástí je i eurobalíza (obr.1), která v bodě průjezdu předává vlaku informace. Skládá ze dvou cívek: Jedna je umístěna mezi kolejemi, druhá ve spodní části vlaku. Při průjezdu vlaku tímto bodem se přenáší informace mezi cívkami na kmitočtu 27 MHz podobně jako u čipů RFID (*Radio Frequency IDentification*).



Obr.1 – Eurobalíza ABA systému ETCS L2 na Švestkové dráze AŽD

Liniové zabezpečení detekuje přítomnost vlaku v celém úseku. Díky tomu:

- Není známá přesná vzdálenost návěstidlu
- + Přenáší stav návěstidla v celém úseku

V Čechách a na Slovensku se používá systém LVZ (*liniový vlakový zabezpečovač*), jehož součástí jsou mobilní jednotky LS90 a MIREL. Tyto systémy využívají zavedení signalizačního proudu 75 Hz nebo 275 Hz do izolovaného úseku kolejí pomocí stykových transformátorů (obr.2). Ten je následně detekován cívkou umístěnou před přední nápravou vlaku. Jednotlivé stavy návěstidla se přenáší pomocí modulace tohoto proudu obdélníkovým signálem o frekvenci 0,9 ÷ 5,4 Hz odpovídajících jednotlivým stavům návěstidla:

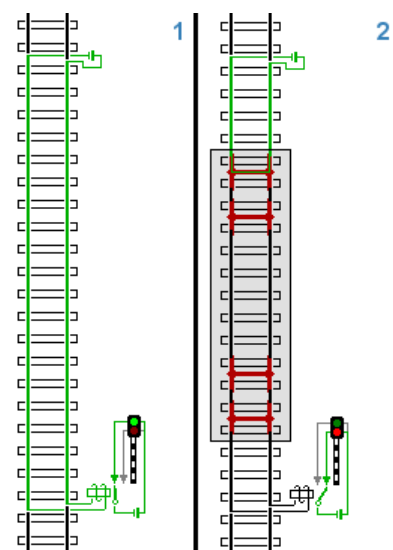
- ➔ 0,9 Hz pro červené světlo (max. 40 km/h)
- ➔ 1,8 Hz pro žluté mezikruží (40 ÷ 100 km/h podle návěstí)

- ➔ 3,6 Hz pro žluté světlo (max. 120 km/h)
- ➔ 5,4 Hz pro zelené světlo (maximální rychlost vlaku)



Obr.2 – Izolované styky se stykovými transformátory ve stanici Praha-Libeň

Je-li úsek volný, vytváří tento proud mezi kolejnicemi napětí, které je detekováno jako "volno". Když do úseku vjede vlak, první nápravou kolejnice mezi sebou šuntuje (propojí) a napětí zmizí. Tento stav je detekován jako "obsazeno", viz obr.3. Aby systém fungoval správně, přivádí se signalizační proud přes stykový transformátor na konci úseku, kde je také umístěno návěstidlo. Když do úseku jede vlak, signalizační proud se uzavírá přes jeho první nápravu, a proto musí být detekční cívky umístěny před ní. Aby se omezil vliv trakčního proudu, jsou před přední nápravu umístěny cívky dvě, před každým kolem jedna. Jejich vinutí jsou zapojena antisériově, díky čemuž se napětí indukovaná v cívkách trakčním proudem odečtou (trakční proud teče v obou kolejnicích stejným směrem), zatímco napětí indukovaná signalizačním proudem se sečtou (signalizační proud se druhou kolejnicí vrací do stykového transformátoru na konci úseku). Je-li úsek volný, detekuje se signalizační proud (resp. napětí) na začátku úseku pomocí druhého stykového transformátoru. Výhoda je, že v případě jakéhokoliv poškození úseku (uvolnění kabelu, lom kolejnice) je úsek také detekován jako obsazený.



Obr.3 – Kolejový obvod

Z hlediska bezpečnosti je výhodné mít takto zabezpečený každý úsek železnice. Z hlediska přehledu nad obsazeností trati je výhodné mít úseky co nejkratší. Vytvoření takového úseku na dosud nezabezpečené trati vyžaduje vytvořit izolovaný styk obou kolejnic na obou koncích a nainstalovat stykové transformátory, tedy celkem:

- ➔ 4 izolované styky
- ➔ 4 stykové transformátory

Rozdělení již zabezpečeného úseku na 2 kratší pak stále vyžaduje vytvořit izolovaný styk obou kolejnic v místě rozdělení a instalovat stykové transformátory, tedy celkem:

- ➔ 2 izolované styky
- ➔ 2 stykové transformátory

Pro přesné provedení izolovaného styku se tento neprovádí řezem kolejnice na místě, nýbrž se připraví v továrně ze 2 kratších kusů kolejnice a při instalaci se pak vyřízne úsek kolejnice odpovídající délky a místo něj se navaří připravený izolovaný styk. To zvyšuje náročnost vytvoření takto zabezpečeného úseku.

Cílem tohoto projektu je navrhnout senzor, který by umožnil měření signalizačního proudu v kolejnici pouze na základě magnetického pole, které okolo ní tento proud vytváří a nevyžadoval by vytváření izolovaných styků. Pro rozdělení úseku na 2 kratší by pak stačil pouze:

- ➔ 1 stykový transformátor na buzení signalizačním proudem
- ➔ 2 snímače signalizačního proudu

Mezi liniové zabezpečovače lze řadit také počítač náprav, který indukčně detekuje počet kol na začátku a na konci úseku. Úsek hlásí jako volný, až když všechny nápravy z úseku odjedou. Je to relativně robustní řešení. Jeho nevýhodou je, že nedetekuje lom kolejnice v úseku a stačí, aby nezapočítal jednu odjíždějící nápravu, a úsek zůstane trvale obsazený. Také neumožňují vysílání kódu.

2. ROZBOR POŽADAVKŮ NA SENZOR

Vzhledem k tomu, že navrhovaný snímač má spolupracovat se stykovým transformátorem v úseku, měl by mít odpovídající vlastnosti a být schopen pracovat za stejných podmínek. Nejpoužívanějším typem pro liniové zabezpečení jsou v současné době stykové transformátory typu DT-075E od AŽD Praha s.r.o. (obr.4). Jejich technické parametry jsou:

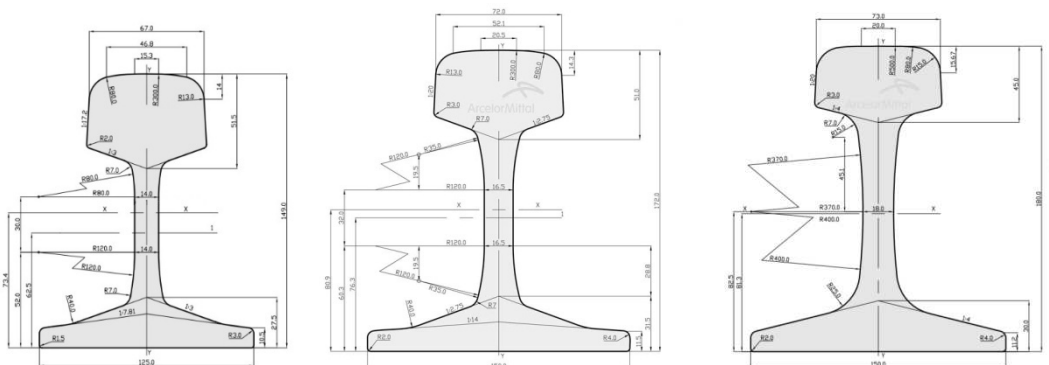
- ▶ Trakce: Stejnoseměrná 3 kV=, střídavá 25 kV~ 50 Hz
- ▶ Trakční proud: 450 A trvale, 100 0A krátkodobě
- ▶ Signalizační proud: max. 2,5 A~ 25 ÷ 400 Hz
- ▶ Izolační pevnost: 4000 V
- ▶ Rozsah pracovních teplot: -40 +70 °C

Na rozdíl od stykového transformátoru, v jehož jádře se magnetické toky vyvolané souhlasnými trakčními proudy rovnou odečítají, senzory budou montovány nezávisle na každé koleji a musí proto fungovat v plném magnetickém poli, aniž by došlo k saturaci. To hrozí především na úsecích stejnosměrné trakce, kde jsou trakční proudy vzhledem k nižšímu napájecímu napětí vyšší. A i když je do roku 2047 v plánu sjednocení napájecí soustavy v ČR na 25 kV- 50 Hz, mělo by být možné senzor instalovat bez rozdílu na tratě stejnosměrné i střídavé. Pro rozumnou možnost vyhodnocování signálu ze senzoru by měl mít napěťovou citlivost S (*Sensitivity*) alespoň v řádu desítek mV na 1 A procházejícího proudu ($S = 20 \div 100 \text{ mV/A}$) s nulovým nebo přesně definovaným fázovým posuvem mezi snímaným proudem a výstupním napětím (některé zabezpečovací obvody využívají kromě detekce amplitudy také detekci fáze signálu).



Obr.4 – Stykový transformátor DT-075E AŽD Praha

Kromě toho ho musí být možné namontovat na všechny 3 typy nejčastěji používaných kolejnic S49, R65 a UIC60, viz obr.5.



Obr.5 – Výkresy kolejnic (zleva S49, UIC60 a R65)

3. PRINCIPY MĚŘENÍ PROUDU

3.1 Odporové (bočník)

Odporové snímání využívá úbytku napětí na odporu průchodem proudu. Obvykle se k tomu využívá speciálního odporového materiálu, jehož odpor se s teplotou téměř nemění. Jeho výhodou pak je teplotní i frekvenční nezávislost citlivosti, která je dána čistě jeho odporem ze vztahu (1) a v bezindukčním provedení může fungovat až do jednotek GHz.

$$u(t) = R \cdot i(t) \rightarrow S = \frac{u(t)}{i(t)} = R \quad (1)$$

V tomto případě by bylo možné použít odporový princip pouze měřením úbytku napětí na samotné kolejnici. Při jejím průřezu 63 cm^2 a měrném odporu oceli $143 \text{ m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ při 20°C vychází napěťová citlivost na 10 metrech kolejnice pouze na $227 \text{ }\mu\text{V}/\text{A}$.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,143 \cdot \frac{10}{6300} = 227 \text{ }\mu\Omega \quad \rightarrow \quad S = R = 227 \text{ }\mu\text{V}/\text{A} \quad (2)$$

Současně s tepelným součinitelem odporu pro železo $+6,5\%/^\circ\text{C}$ by se citlivost při provozu v krajních teplotách lišila o 36% a celý systém je galvanický spojený s kolejovým obvodem. V souhrnu:

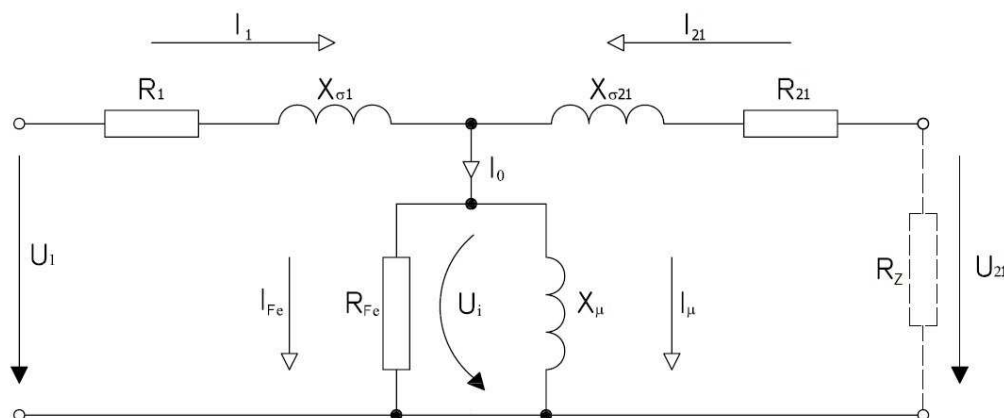
- + Jednoduché řešení
- + Frekvenčně nezávislé
- Velmi nízká citlivost
- Závislá na teplotě
- Bez izolační schopnosti 4kV
- Neumožňuje přímé odečtení trakčních proudů

3.2 Proudový transformátor

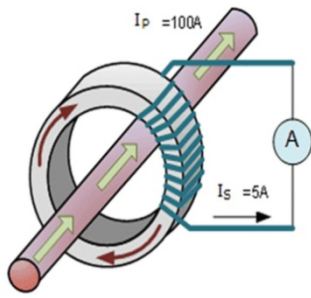
Proudový transformátor využívá transformace proudu z primárního vinutí do vinutí sekundárního v převráceném poměru počtu závitů podle vzorce (3).

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3)$$

Nejčastější realizací proudového transformátoru je toroidní jádro, skrz které prochází vodič, jímž procházející proud má být měřen, a vytváří tak 1 závit primárního vinutí (obr.7). Na jádře je dále navinuto N_2 závitů sekundárního vinutí, do kterého se indukuje $1/N_2$ primárního proudu. Aby toto platilo, musí sekundární vinutí pracovat do velmi nízké impedance (odporu R_Z), aby se prostřední člen sytící indukčnosti X_μ a odporu R_{Fe} představujícího ztráty v železe nezohlednili.



Obr.6 – Náhradní schéma transformátoru



Obr.7 – Proudový transformátor

Stejně tak je potřeba zajistit nízký odpor sekundárního vinutí R_{21} použitím silnějšího vodiče a nízké rozptylové indukčnosti $X_{\sigma 1}$ primárního a $X_{\sigma 21}$ sekundárního vinutí zajištěním silné vazby pomocí uzavřeného magnetického jádra. Jinak dochází ke snižování proudu indukovaného do sekundárního vinutí vlivem rostoucí rozptylové indukčnosti $X_{\sigma 21}$ vzhledem k X_{μ} , která zároveň způsobuje významný fázový posun mezi proudem primárním a sekundárním. Primárním vinutím je zde kolejnice a není proto možné takové jádro kolem ní umístit, neboť by bránilo jejímu pojezdění.

Jistým řešením by byl otvor ve stojině kolejnice, kdy by se magnetickým jádrem proudového transformátoru obepnula pouze její pata. Tím by se sice v proudovém transformátoru zohlednila pouze část proudu odpovídající poměru průřezů kolejnice jdoucí skrz jádro a mimo ně, ale umožnila by provoz i při průjezdu vlaků, což je cílem. Konkrétní dosažitelné hodnoty by bylo vhodné ověřit simulací. V souhrnu:

- + Umožňuje transformaci proudu do galvanicky odděleného obvodu
- + Na stejnosměrné trakci oddělí všechny trakční proud
- + Přímý výstup napětí úměrného proudu
- Vyžaduje vrtání většího otvoru do stojiny kolejnice
- Vyžaduje velký průřez sekundárního vinutí (nízký odpor)

3.3 Vzduchová indukční cívka

K měření proudu lze také využít indukčního zákona podle vzorce (4), kde napětí indukované v cívce naprázdno (zatížené pouze vysokou impedancí) je přímo úměrné počtu jejích závitů N a časové změně magnetického toku Φ .

$$U_i = -N \cdot \frac{\delta\Phi}{\delta t} \quad (4)$$

Magnetický tok v tomto případě vytváří primární vodič (kolejnice). Celkový magnetický tok vstupující do cívky je dán dvojným integrálem magnetické indukce B přes plochu cívky S .

$$\Phi = \iint \mathbf{B} \, d\mathbf{S} \quad (5)$$

Její citlivost tak lze kromě přidávání závitů zvýšit také zvětšováním její plochy. Intenzita magnetického pole H klesá nepřímo úměrně vzdálenosti r od zdroje (kolejnice) a větší vliv na citlivost cívky tak bude mít její rozšiřování podél kolejnice než napříč.

$$\mathbf{H} = \frac{N \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (6)$$

Z rovnice pro indukované napětí (4) lze získat napěťovou citlivost následující úpravou. Uvažujme sinusový budící proud (7).

$$I(t) = I_{max} \cdot \sin(2\pi ft) \quad (7)$$

Ve vzduchu můžeme navíc počítat lineární závislost B a H (8).

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H} \quad (8)$$

Po dosazení (7) do (6), výsledku do (8) a přibližném zjednodušení (5) na $\Phi = B \cdot S$ vznikne vztah pro magnetický tok (9).

$$\Phi = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I_{max} \cdot \sin(2\pi ft)}{2\pi} \cdot S \quad (9)$$

Ten po dosazení do (4) a zderivování dává výsledný vztah pro indukované napětí U_i (10).

$$U_i = -\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot I_{max} \cdot f \cdot \cos(2\pi ft) \cdot S \quad (10)$$

Z čehož vyplývají dvě skutečnosti:

1. Amplituda indukovaného napětí a tudíž i citlivost bude přímo úměrně růst s frekvencí
2. Indukované napětí bude mít oproti měřenému proudu fázový posun 90°

Oba tyto nedostatky lze odstranit následnou integrací pomocí jednoduchého zapojení integrátoru s operačním zesilovačem, který ze vzorce (4) odstraní derivaci a výsledný vztah pro výstupní napětí bude vypadat podle (11).

$$U_{out} = -\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot I_{max} \cdot \sin(2\pi ft)}{2\pi} \cdot S \quad (11)$$

Bude-li cívka umístěna mezi kolejnicemi, může sloužit ke snímání signalizačního proudu v obou kolejnicích současně, přičemž se v ní rovnou odečtou souhlasné trakční proudy. Na výslednou citlivost cívky však budou mít vliv i všechny ocelové součásti v kolejišti, které budou koncentrovat magnetický tok. Nehledě na to, že samotná kolejnice je tvořena magnetickou ocelí a tak pro proudovou hustotu tekoucí v jedné části jejího průřezu bude sloužit zbytek průřezu jako magnetické jádro. Pro realizaci cívky by bylo možné použít např. vícežilový kabel, jehož vodiče zapojené do série by posloužily jako závity cívky. Po konzultaci s AŽD se toto řešení nejeví jako konstrukčně optimální, neboť by mohlo snadno dojít k jeho poškození a ideální by byl kompaktnější senzor montovaný přímo na kolejnici. V souhrnu:

- + Jednoduché řešení
- + Jen 1 cívka na obě kolejnice
- + Citlivost po je po integraci nezávislá na frekvenci
- + Přímo odečítá trakční proudy
- + Na stejnosměrné trakci oddělí všechny trakční proud

- + Galvanické oddělení
- Málo robustní
- Vyžaduje integrátor

3.4 Indukční cívka s ocelovým jádrem

Využívá stejného principu jako vzduchová indukční cívka s tím rozdílem, že má v sobě navíc vložené magnetické jádro. To díky $\mu_r \gg 1$ (řádově tisíce) koncentruje do cívky více magnetického toku a zároveň ho zesiluje, čímž se výrazně zvýší výstupní napětí podle (11). Cívku je tak možné udělat menší a může zároveň mít se stejným množstvím vodiče více závitů. Takové řešení už může být montované přímo na každou kolejnici zvlášť. Jen je potřeba zajistit, aby nedošlo k přesycení jádra ani při maximálních trakčních proudech. I když na výstupním napětí se budou projevovat pouze trakční proudy střídavé, jádro se bude sytit i proudy stejnosměrnými, které mohou mít větší amplitudu. V souhrnu:

- + Robustní řešení
- + Trakční proudy lze odečíst sériovým zapojením
- + Nevadí vyšší odpor cívky
- + Potenciálně vysoká citlivost
- Vyžaduje integrátor

3.5 Rogowského cívka

Rogowského cívka využívá stejného principu jako vzduchová indukční cívka, tedy indukce napětí změnou magnetického toku a liší se jen konstrukčním provedením. Je navinuta na nemagnetickém toroidním jádře, což přináší několik výhod:

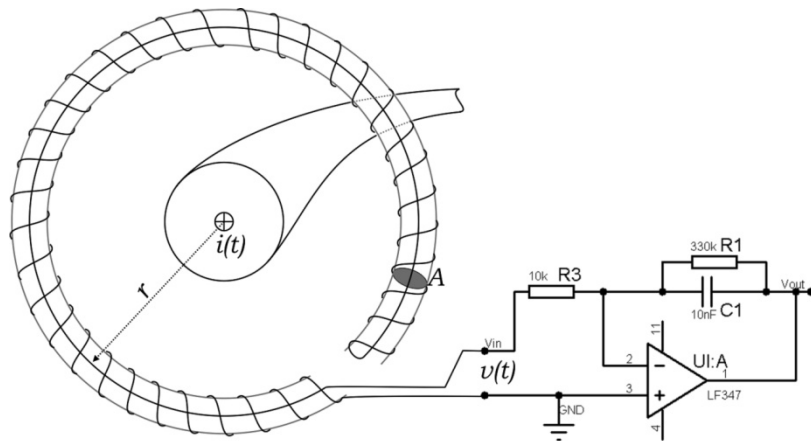
- ➔ Je malá a lehká
- ➔ Nelze ji přesytit
- ➔ Jádro může být libovolně ohebné a v jednom místě rozdělitelné

Proto se využívá především u přenosných měřících přístrojů pro měření velkých střídavých proudů. Indukované napětí lze vyjádřit vztahem (12).

$$u_2(t) = M \cdot \frac{\delta i(t)}{\delta t} \quad (12)$$

Přičemž vzájemnou indukčnost M lze zjednodušeně vyjádřit jako (13), kde N počet závitů, A je průřez toroidu a l je délka střední siločáry na poloměru r , viz obr.8.

$$M = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot A}{l} \quad (13)$$



Obr.8 – Schéma Rogowského cívky s integrátorem

Při zohlednění proudu sinusového průběhu 1 A~ 50 Hz, 1000 závitů cívky, průměru toroidu 4 cm a délky střední siločáry cca 40 cm (obvod kolejnice), vychází vzájemná indukčnost 4 uH a indukované napětí 1,26 mV/A.

Konstrukce tu opět naráží na problém, že toroidní cívka nemůže být vedena přes hlavu kolejnice. Řešení by bylo, podobně jako u proudového transformátoru, vést jádro s cívkou pouze kolem paty kolejnice otvorem v stejně, případně vytvořit cívku s otevřeným jádrem (*i když je jádro také vzduch, pořád využívá rozprostření cívky po celém obvodu*). V obou případech by byla výsledkem ještě nižší citlivost. V součtu tedy:

- + Na stejnosměrné trakci oddělí všechny trakční proud
- Nízká citlivost
- Málo robustní (lehké řešení zde není výhodou)
- Vyžaduje integrátor

3.6 Hallova sonda

Využívá Hallova jevu, kdy se v polovodičové destičce protékáné proudem (v ose X) indukuje příčné napětí (v ose Y) úměrné kolmo procházejícímu magnetickému poli (v ose Z). Důvodem je vychylování elektronů z jejich dráhy podle indukčního zákona (14).

$$U = \mathbf{B} \times \mathbf{I} \cdot l \quad (14)$$

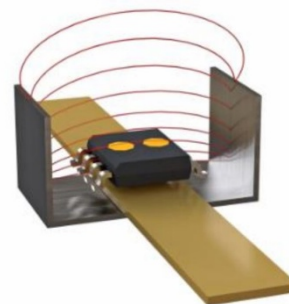
Na tomto principu se vyrábějí integrované obvody:

- ➔ Hallovy senzory s výstupem on/off (dveřní spínače, polohové snímače, snímače otáček)
- ➔ Hallovy sondy s analogovým výstupem pro měření proudu

Hallovy sondy pro měření proudu se ještě dělí na:

- ➔ Měření malých proudů, kdy je proud zaváděn přímo dovnitř obvodu
- ➔ Měření velkých proudů, kdy stačí obvod umístit do bezprostřední blízkosti vodiče

Zde by byl jednoznačně potřeba analogový senzor pro velké proudy. Výrobu takových obvodů se nejvíce zabývá firma Melexis. Tyto obvody jsou většinou vyrobeny technologií CMOS a jsou určeny pro spolupráci s dalšími digitálními obvody, pročež s nimi sdílí i napájecí napětí 5V. Příkladem může být obvod *MLX91216* s těmito vlastnostmi:



Obr.9 –MLX91216
pro měření proudu

- ▶ Napájecí napětí: 5 V ±10 %
- ▶ Napájecí proud: max. 15 mA
- ▶ Citlivost: nastavitelná 20 ÷ 350 mV/mT
- ▶ Rychlost odezvy: 2 μs
- ▶ Frekvenční rozsah: 0 ÷ 250 kHz
- ▶ Rozsah pracovních teplot: -40 +150 °C
- ▶ Lineární rozsah výstupního napětí: 0,5 ÷ 4,5 V (10% ÷ 90% Vcc)
- ▶ Výstupní napětí při nulovém proudu 2,5 V (50% Vcc)

Aby mohl obvod na svém výstupu zohlednit obě polaritu snímaného proudu, odpovídá nulovému proudu výstupní napětí 2,5 V. Zároveň maximální výstupní napětí pro zachování linearitu je 4,5 V. Maximální amplituda výstupního signálu tak může být 2 V. Chceme-li tedy navrhnout senzor schopný snímat sinusový proud 500 A $\bar{~}$, musí být schopen měřit amplitudu až 707 A (špičková hodnota). Maximální možná citlivost tak je podle (15).

$$S_{max} = \frac{U_{outmax}}{I_{max}} = \frac{2V}{707A} = 2,82 \text{ mV/A} \quad (15)$$

V souhrnu:

- + Citlivost frekvenčně i teplotě nezávislá
- + Široký frekvenční rozsah
- Nízká citlivost
- Vyžaduje napájení senzoru

3.7 Magnetorezistor

Magnetoodporový princip využívá k měření magnetického pole polovodičový materiál, jehož vodivost je různá ve směrech X a Y. Výrazně nižší vodivosti v kolmém směru je docíleno vodivými jehličkami kovu v jinak odporovém materiálu polovodiče. Bez magnetického pole proud teče jehličkami napříč, v magnetickém poli se začnou elektrony vychylovat k jedné straně jako u Hallovy sondy, odkud je kovová jehlička svádí zpět na druhou stranu polovodiče. Tím se zvýší délka jejich cesty odporovým materiálem a efektivní odpor stoupne.

Magneto odpor se nevyrábí jako samostatná součástka. Integrované obvody využívající tento princip slouží primárně k účelům:

- ➔ Snímání otáček s výstupem on/off (např. VM821)
- ➔ Snímání úhlu natočení s analogovými výstupy *sin* a *cos* (např. TLE5501)

Přičemž ani jeden z principů se pro měření proudu z intenzity magnetického pole nehodí. Jediný obvod, který by se dal použít je KMZ20M, který obsahuje čistě jen jeden plný magneto odporový můstek. Jeho vlastnosti jsou:

- ▶ Napájecí napětí: 5 V \pm 20 %
- ▶ Maximální intenzita pole pro lineární výstup: 2000 A/m
- ▶ Citlivost: 5,5 mV/V / kA/m

Z nich vyplývá, že maximální výstupní napětí při napájení 5 V a intenzitě pole 2 kA/m je 55 mV. Což pokud by mělo opět odpovídat proudu kolejnicí 707 A, napěťová citlivost bude $55 \text{ mV} / 707 \text{ A} = 78 \text{ } \mu\text{V/A}$, což je ještě méně než u odporového snímání. V souhrnu:

- Nabízí se jediný vhodný obvod
- Velmi nízká citlivost
- Vyžaduje napájení

3.8 Shrnutí

Všechny principy kromě odporového měření zajišťují galvanické oddělení měřicího obvodu od obvodu kolejového. Odporové a magneto odporové měření lze rovnou vyloučit pro velmi nízkou citlivost. Stejně tak měření Hallovo sondou, které naráží na velikost napájecího napětí. Vzduchová indukční cívka vyžaduje velkou plochu, což není pro podmínky kolejiště dostatečně robustní řešení. Rogowského cívka také není pro venkovní podmínky dost robustní a má malou citlivost. Hlavní nevýhodou proudového transformátoru zůstává nutnost vrtat velký otvor pro jádro do stojiny kolejnice. V tomto ohledu je nejnadějnějším řešením indukční cívka s ocelovým jádrem, která nabízí jak snadnou instalaci, tak vysokou citlivost.

4. SIMULACE INDUKČNÍ CÍVKY S OCELOVÝM JÁDREM

4.1 Výběr simulačního programu

Simulační software nepatří mezi nejjednodušší programy. Maxwellovy rovnice (16÷19) mají analytické řešení pouze pro pár základních konfigurací a proto se složitější obvody nejčastěji řeší iterativní metodou FEM (Finite Element Method).

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\delta \mathbf{D}}{\delta t} \quad (16)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (17)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\delta \mathbf{B}}{\delta t} \quad (18)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (19)$$

Ta rozdělí objekt pomocí sítě (*Mesh*) na konečný počet bodů a počítá hodnoty elektrického a magnetického pole v každém z nich, přičemž udělá několik iterací pro dosažení co nejmenší chyby. Pokud dosažená přesnost výsledku není dostatečná, lze vytvořit síť s více body, čímž bude výsledek přesnější, jen se prodlouží doba výpočtu.

Simulační programy se od sebe liší hlavně tím, kolik různých parametrů simulace se v nich dá nastavit a které se při simulaci zohlední. Na trhu simulačních programů je největším tvůrcem a dodavatelem firma Ansys, která vyvíjí simulační programy pro mnoho inženýrských oborů. Nejpoužívanějšími balíky jsou *Ansys Mechanical*, pro statické a dynamické pohybové simulace, proudění a tepelné jevy, a *Ansys Electronics*



Obr.10 – Úvodní obrázek Ansys ED

Desktop, určený pro stejnosměrné nízkofrekvenční (NF) i vysokofrekvenční (VF) elektromagnetické simulace. Na 2.místě je software firmy Siemens, který umožňuje provádět mnoho mechanických a elektrických simulací v rámci svého 3D cadu Solid Edge. Většina menších firem zabývajících se simulacemi se postupně stala jejich součástí. Nejlepším volně dostupným programem pro elektromagnetické simulace je *FEMM*, který ovšem umožňuje pouze 2D simulace. V rámci FEL ČVUT máme k dispozici akademickou licenci na produkty Ansys. Rozhodl jsem se proto použít *Maxwell 3D Design* z balíku *Ansys Electronics Desktop*.

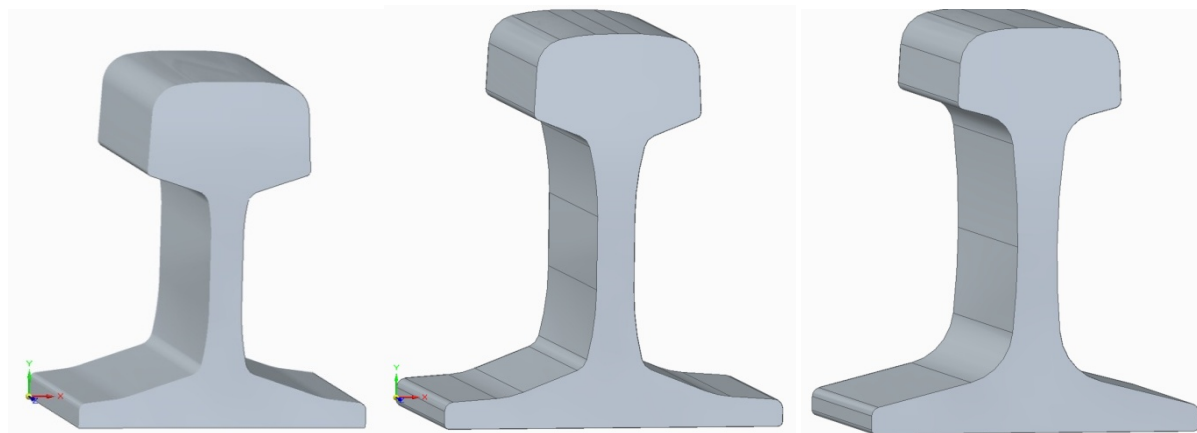
4.2 Nastavení simulace

Ansys Maxwell 3D umožňuje provádět simulace stejnosměrné (*electrostatic / magnetostatic*), které počítají pouze s potenciálem, NF harmonické simulace (*Eddy current* - vířivé proudy), které počítají s harmonickými napětími a proudy na dané frekvenci a NF neharmonické (*transient*), kde lze rovnicí zadat libovolný průběh napětí a proudu. Pro VF simulace je v balíku *Electronics Desktop* samostatný simulátor HFSS (*High Frequency Structure Simulator*).

Zde je cílem simulovat buzení sinusovým proudem o frekvenci $25 \div 400$ Hz, proto ideálním nástrojem bude simulátor *Eddy current* (vířivých proudů), pro simulaci sycení stejnosměrným proudem lze použít *Magnetostatic* nebo nastavit velmi nízkou frekvenci v rámci *Eddy current*.

Pro vytvoření simulačního projektu stačí jít v aplikaci *Electronics Desktop* do záložky *Project* -> *insert Maxwell 3D design*. Pak už lze vložit geometrii ve formátu *.step* nebo ji nakreslit. Prostředí má všechny funkce 3D cadu, takže si lze požadovanou geometrii nakreslit přímo v něm nebo ji poskládat ze základních tvarů pomocí součástí, průniků těles a podobně. Hlavní výhodou takto vytvořené geometrie je, že všechny rozměry a posunutí těles vůči sobě lze parametrizovat a udělat pak parametrickou simulaci pro různou délku jádra, tloušťku jádra či vzájemnou polohu. Stejně lze parametrizovat frekvenci či proud, který v obvodu teče.

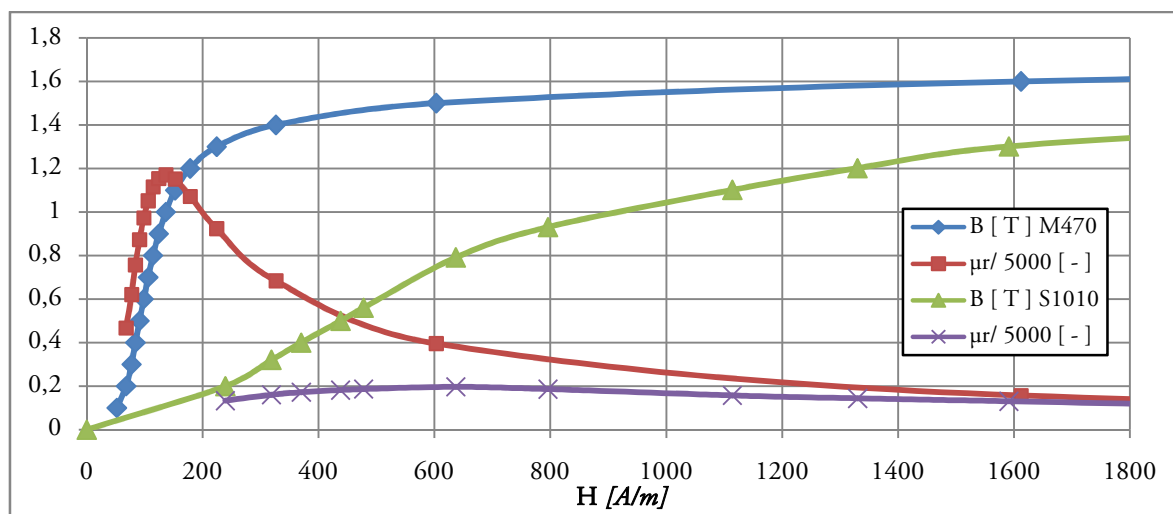
Pro kreslení geometrie, kterou jsem neměl v úmyslu parametrizovat, jsem použil 3D cad *Solid Edge*, jehož všechny potřebné kreslicí funkce jsou ve volně dostupné verzi *community* a ze všech dostupných 3D programů se mi v něm kreslí nejlépe. Podle výkresů kolejnic dostupných na internetu jsem vytvořil jejich 3D modely. Simulace jsem začal dělat pro nejmenší z nich S49.



Obr.11 – 3D modely kolejnic (zleva S49, UIC60 a R65)

Po vložení či vytvoření geometrie je potřeba zvolit materiál pravým kliknutím na objekt a výběrem *Assign Material*. V základní knihovně jsou k dispozici běžné materiály jako *ocel 1010*, kterou je tvořena kolejnice, *měď*, kterou bude tvořena cívka a *vzduch* či *vakuum*, které bude vyplňovat obklopující region. Ten se vytvoří po vložení geometrie automaticky, přičemž jeho velikost je +100% velikosti geometrie na každou stranu. Program umožňuje 2 druhy buzení:

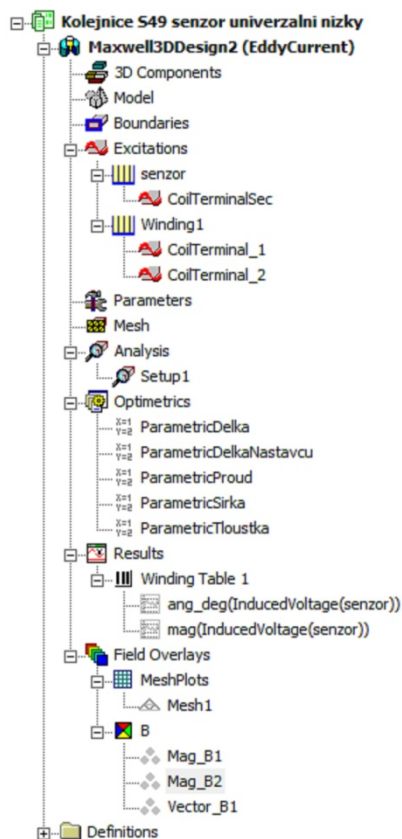
closed-loop a *start/stop*. Kolejnice má 2 budící body a je tak tou 2. variantou. Proto je potřeba zvolit délku regionu v ose kolejnice +0%, aby region začínal a končil tam, kde začíná a končí kolejnice a budící plochy tak byly na hraně regionu. Naopak ve zbylých dvou osách je výhodné region zvětšit na +300%, neboť elektromagnetické pole kolem kolejnice se bude simulovat pouze uvnitř tohoto regionu. Pokud požadovaný materiál není v knihovně k dispozici, lze si buď stáhnout a vložit rozšiřující knihovnu nebo si některý z materiálů zkopírovat a upravit. Zde jsem si takto vytvořil M470-050A jako kopii oceli 1010 s upravenou magnetizační charakteristikou podle katalogu výrobce. V položce *Composition* lze kromě *Solid* zvolit *Lamination*, což odpovídá jádru z plechů.



Obr.12 – Srovnání magnetizační charakteristiky M470-050A s ocelí S1010

Dále je potřeba nastavit buzení kliknutím na plochu začátku kolejnice a výběrem *Assign Excitation->Current*, respektive pro následné využití kolejnice jako *vinutí Assign Excitation->Coil terminal*. Stejně tak na plochu 2. konce kolejnice, kde však orientace proudu (terminálu) musí být opačná. Toto nastavení se objeví v levém menu pod položkou *Excitation*. Pro nastavení kolejnice jako primárního vinutí snímače, stačí v menu pod *Excitation* vybrat *Add Winding*, oba terminály do něj přidat a nastavit proud.

Nejjednodušší způsob, jak vytvořit jádro s cívkou, je vytvořit kostku z oceli jako jádro. Následně vytvořit kostku o 1mm větší než jádro, pak kostku odpovídající cívce a kostku o 1mm větší než jádro od ní odečíst. Tím vznikne smyčka cívky okolo jádra. 1mm mezera mezi cívkou a jádrem zajišťuje, aby byly elektricky oddělené a napětí indukované v cívce se nezkratovalo přes ocelové jádro.



Obr.13 – Hlavní menu projektu v Ansys Maxwell

následně spustí sousední tlačítkem *Analyze All* a průběh simulace lze sledovat v záložce *Results->Solution data->Convergence*. Po doběhnutí simulace se v tabulce objeví výsledky a po kliknutí na některé z nastavených zobrazení pole se objeví jeho vypočítané rozložení. Kliknutím na barevnou stupnici magnetického pole lze nastavit její rozsah, zvolit logaritmický průběh, případně nastavit velikost šipek u vektorového pole. Pro měření hodnoty pole v konkrétním bodě lze použít *markery*.

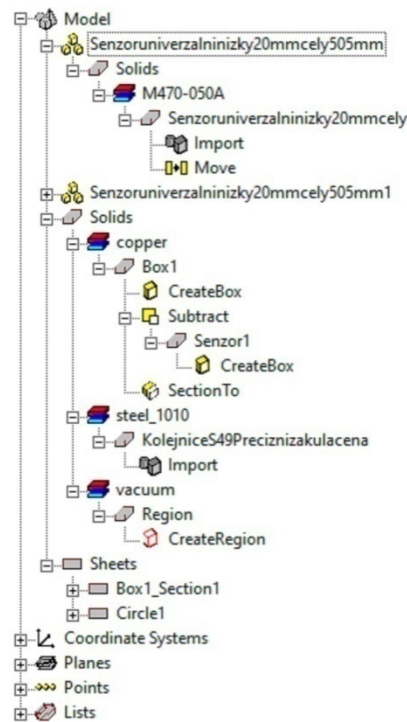
Pro nastavení parametrické simulace je potřeba nejprve parametrizovat požadovanou geometrii / proud / frekvenci prostým napsáním názvu místo čísla a proměnná se automaticky vytvoří se zvolenou výchozí hodnotou. Tu lze kdykoliv změnit pod položkou *Optimetrics->ParamtricSetup->Edit Variables->Edit Design Variables*. Pak stačí vytvořit konfiguraci pod *Optimetrics->Add->Parametric*, kde se nastaví, která proměna se bude měnit, v jakém rozsahu a s jakým

Nyní je vhodné cívku v libovolném místě přerušit nakreslením obdélníku, který bude cívku protínat, tím vytvořit *Section* a nastavit ji jako *Coil Terminal*, který bude v režimu *closed-loop* tvořit sekundární vinutí snímače.

Před spuštěním simulace je ještě potřeba nastavit *Analysis->Setup*, tedy maximální počet adaptivních kroků a požadovanou přesnost výsledku. Pokud se jí během nich nepodaří dosáhnout, zobrazí se výsledek s nejvyšší dosaženou přesností. Také se tu dá nastavit frekvence simulace buď pevně nebo jako proměnná.

Rovnou si lze nastavit také požadované výsledky, v našem případě *Results->Winding table* (tabulka vinutí). Zajímavá bude velikost amplitudy (*Magnitude*) a fáze (*Angle*) indukovaného napětí v cívce senzoru. Výsledkem může být také rozložení pole, které lze zvolit u vybraného povrchu nebo plochy přes *Fields->B->Mag_B* nebo *Vector_B*. To se pak objeví pod položkou *Field overlays*. Další vykreslení pole na libovolné ploše či v objemu lze přidávat i po doběhnutí simulace.

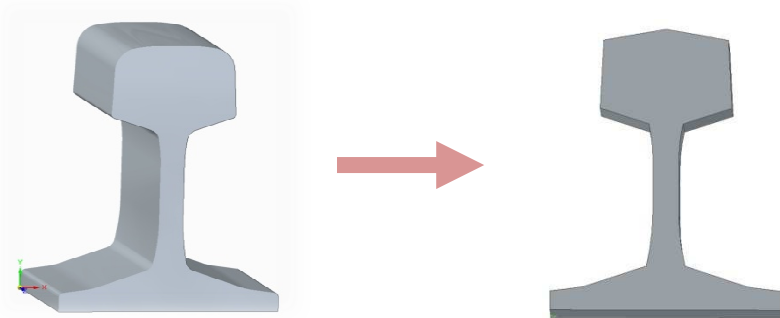
Před spuštěním simulace je vhodné dát nejprve v horním menu *Simulation->Validate*, což ověří, že jsou všechny potřebné údaje správně zadané. Simulace se



Obr.14 – Menu mechanických prvků v Ansys Maxwell

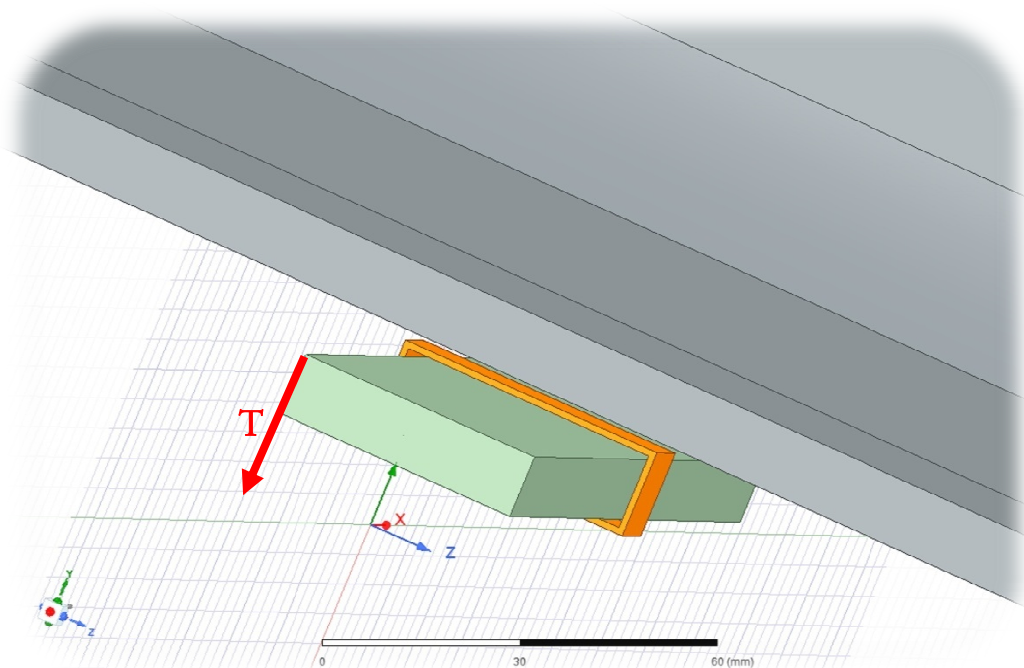
krokem nebo přímo zvolit její hodnoty. Důležité je v posledních záložce zaškrtnout *Save Fields and Mesh*, aby bylo možné si po proběhnutí všech simulací prohlédnout výsledky každé z nich. Parametrických simulací lze mít vytvořených více a provádět vždy jen jednu, zatímco ostatní budou *Disabled*.

Kolejnice obsahuje spoustu zaoblení, a jak ukázala první simulace, zaoblený tvar pro rychlé simulace není příliš vhodný. Pro porovnání: Simulace s přesným tvarem kolejnice zabrala pro dosažení 4% chyby 68 minut, zatímco při použití zjednodušeného tvaru kolejnice aproximovaného pouze několika přímkovými úseky, trvalo dosažení výsledku s 4% chybou pouze 3,5 minuty, neboť pro tuto přesnost stačila 10x hrubší síť (s 10x méně body).



Obr.15 – Zjednodušení tvaru kolejnice S49 pro účely simulace

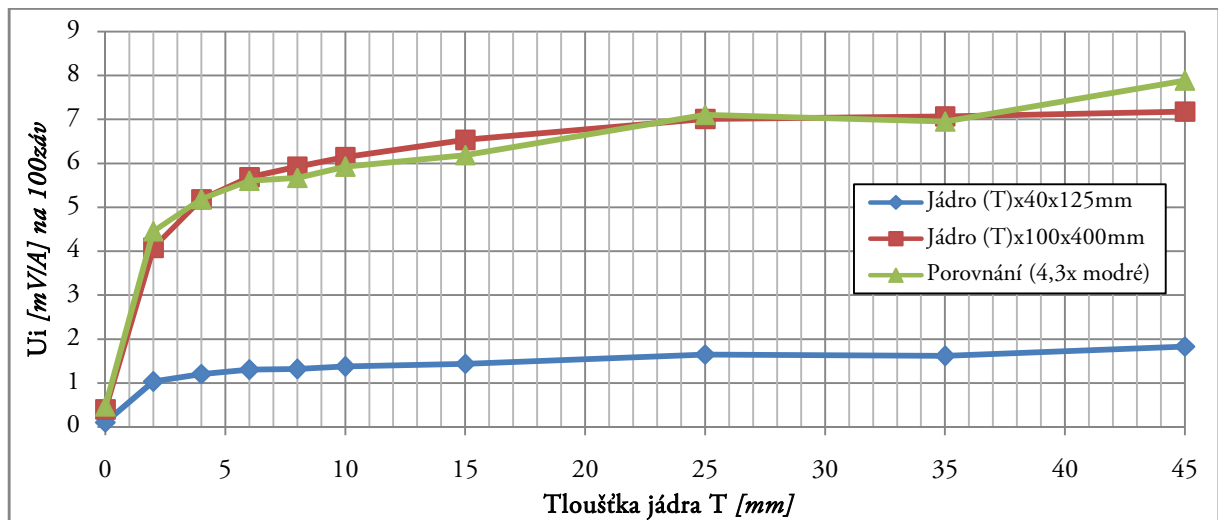
4.3 Simulace tloušťky jádra



Obr.16 – Jádro 10x40x125mm pod kolejnici (oranžová je cívka)

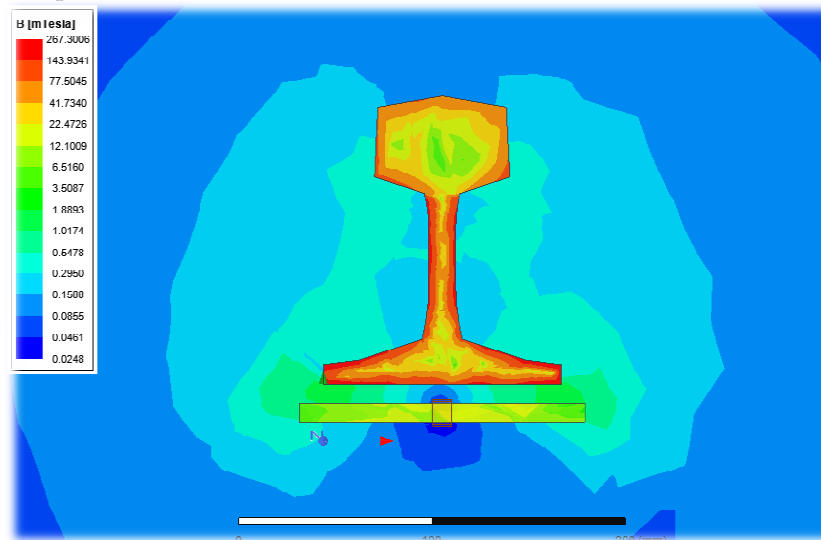
Výhodou simulátoru *Maxwell 3D* je, že lze mít jako výsledek kromě rozložení pole rovnou indukované napětí v cívce umístěné na konkrétním tvaru jádra. Jako základní rozměry jsem vzal jádro 10 mm tlusté, 40 mm široké (podél kolejnice) a 125 mm dlouhé (odpovídá délce paty kolejnice S49). Simulace jsem prováděl při proudu kolejnicí 100 A- 50 Hz a s cívkou 1 závit, 1 cm širokou. Hodnoty indukovaného napětí při 100A na 1 závit jsou ekvivalentní 1A na 100 závitech a tedy citlivosti v mV/A s cívkou 100 závitů.

První otázkou byla závislost indukovaného napětí na tloušťce jádra. Jak je vidět z následujícího grafu (obr.17), citlivost je zpočátku značná (U_i roste s tloušťkou rychle), ale postupně se začíná zarovnávat a další rozšiřování jádra přestává mít na indukované napětí výrazný vliv.



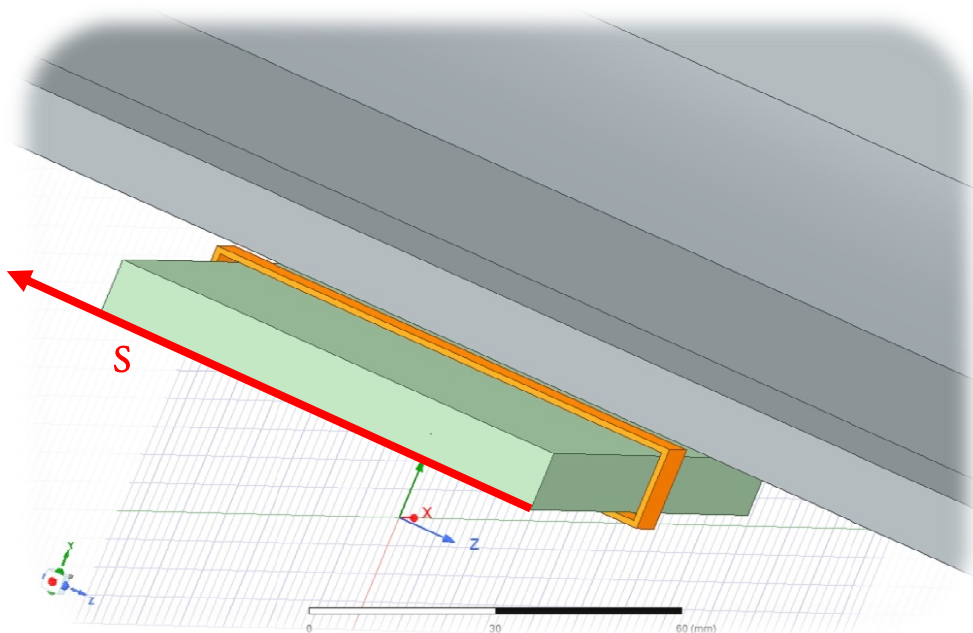
Obr.17 – Graf závislosti indukovaného napětí na tloušťce jádra

Pro ověření nezávislosti tohoto měření na ostatních rozměrech jsem udělal simulace pro 2 velikosti jádra, přičemž zelený graf je naškálováný modrý a je vidět, že průběhy zeleného a červeného jsou velmi podobné. Ostatně z rozložení pole (obr.18) vyplývá, že už do jádra tloušťky 10mm se zkoncentruje většina magnetického pole. Zároveň nejsilnější pole je uprostřed jádra je proto výhodné mít cívku právě zde.



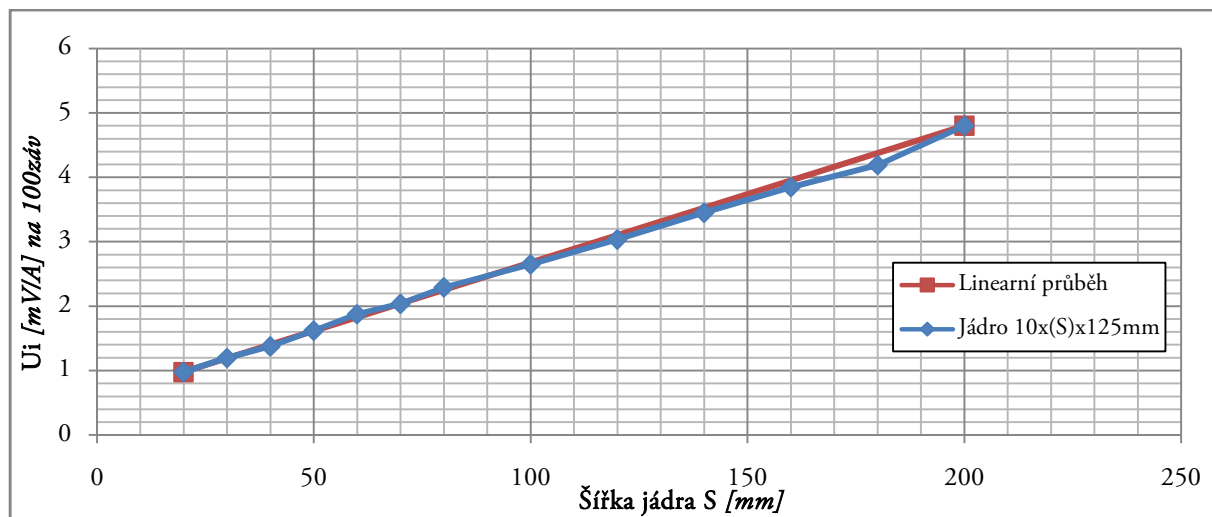
Obr.18 – Rozložení mag. pole se snímačem 10x40x150mm při 100A

4.4 Simulace šířky jádra



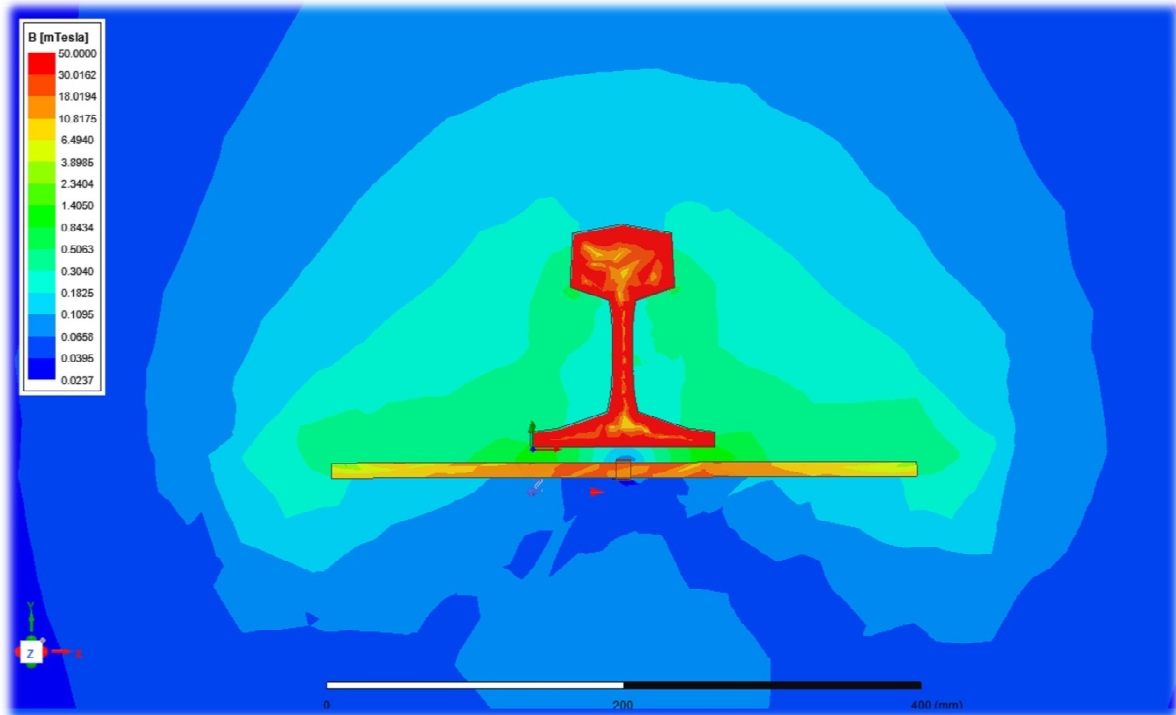
Obr.19 – Jádro 10x80x125mm pod kolejnicí

Druhou otázkou byla závislost indukovaného napětí U_i na šířce jádra S . Jak je vidět z následujícího grafu (obr.20), indukované napětí roste s šířkou jádra zhruba lineárně (v porovnání s červenou přímkou spojující počáteční a koncový bod grafu).



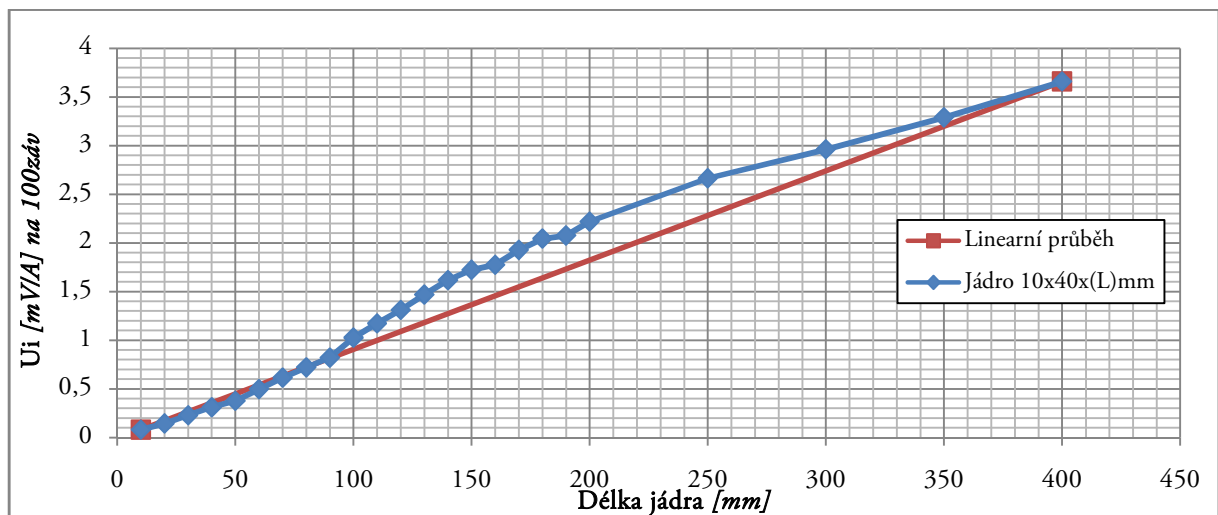
Obr.20 – Graf závislosti indukovaného napětí na šířce jádra

4.5 Simulace délky jádra



Obr.21 – Rozložení mag. pole se snímačem 10x40x400mm při 100A

Posledním parametrizovaným rozměrem je délka. Zde je opět patrné mírné snižování citlivosti s délkou (oproti červenému lineárnímu průběhu), ale ne tak znatelné, jako u tloušťky. Pro zvyšování citlivosti tak bude nejefektivnější zvětšování šířky jádra, pak délky a až nakonec tloušťky.



Obr.22 – Graf závislosti indukovaného napětí na šířce jádra

4.6 Simulace pólových nástavců

Tato část práce je neveřejná a je obsažena v technické zprávě pro zadavatele.

4.7 Simulace tvarových senzorů

Tato část práce je neveřejná a je obsažena v technické zprávě pro zadavatele.

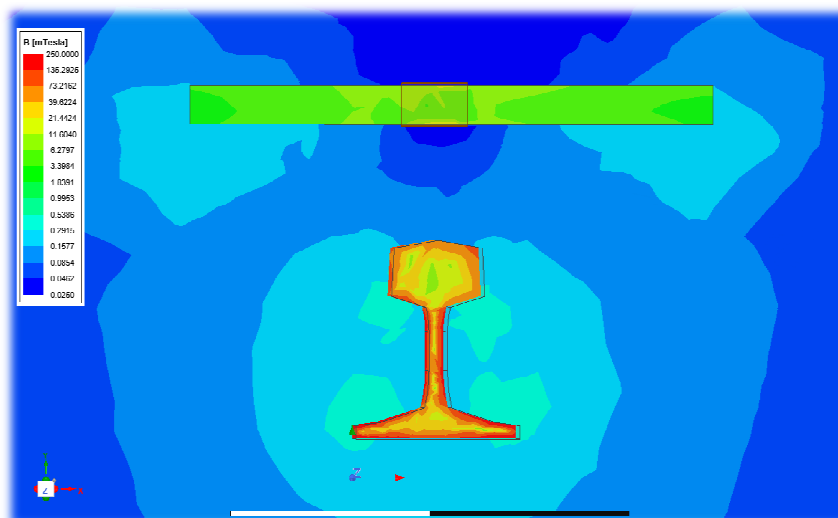
4.8 Simulace dalších konfigurací

4.8.1 Vlakový senzor pro porovnání

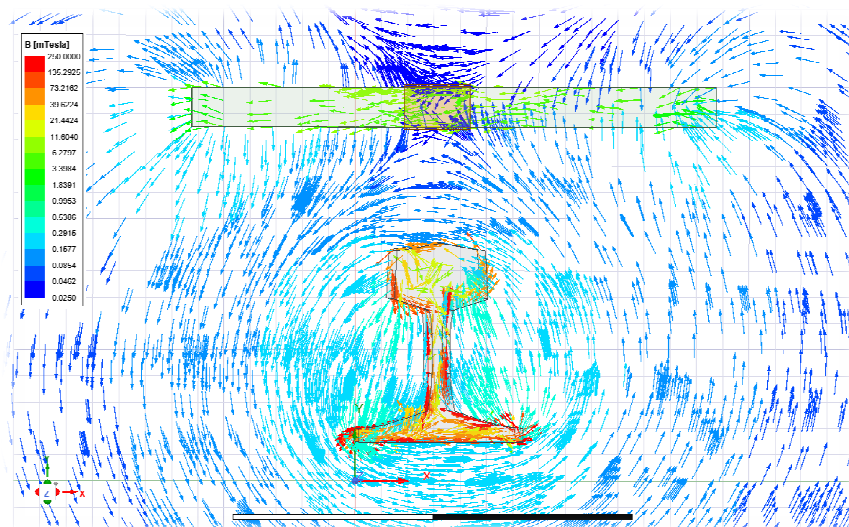
Podobný senzor tomu navrhovanému se používá u vlakové části systémů MIREL a LS90. S největší pravděpodobností se jedná o zapouzdřenou cívku s ocelovým jádrem, umístěnou před první nápravou vlaku. Dle dostupných fotografií (obr.31) lze odhadnout, že průřez jádra bude maximálně 30 x 30 mm, délka max. 40 cm a vzdálenost nad kolejnicí min. 10 cm. Udělal jsem tedy simulaci citlivosti této konfigurace pro porovnání s navrhovaným snímačem. Jak je vidět na rozložení pole (obr.32/33), cívka takto daleko zkoncentruje do jádra jen minimum magnetického pole. Citlivost vyšla 1,94 mV.



Obr.31 – Snímač LS90



Obr.32 – Pole kolejnice s vlakovým senzorem



Obr.33 – Vektorové zobrazení pole kolejnice s vlakovým senzorem

4.8.2 Uzavřené jádro skrz hlavu

Tato část práce je nevěřejná a je obsažena v technické zprávě pro zadavatele.

4.8.3 Uzavřené jádro skrz otvor

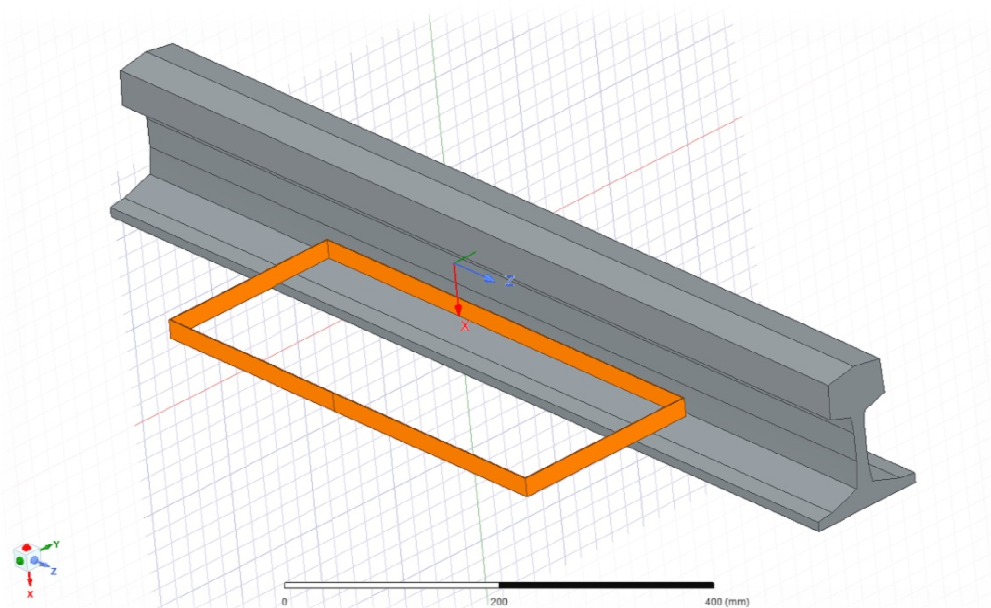
Tato část práce je nevěřejná a je obsažena v technické zprávě pro zadavatele.

4.8.4 Boční jádro

Tato část práce je nevěřejná a je obsažena v technické zprávě pro zadavatele.

4.8.5 Vzduchová cívka

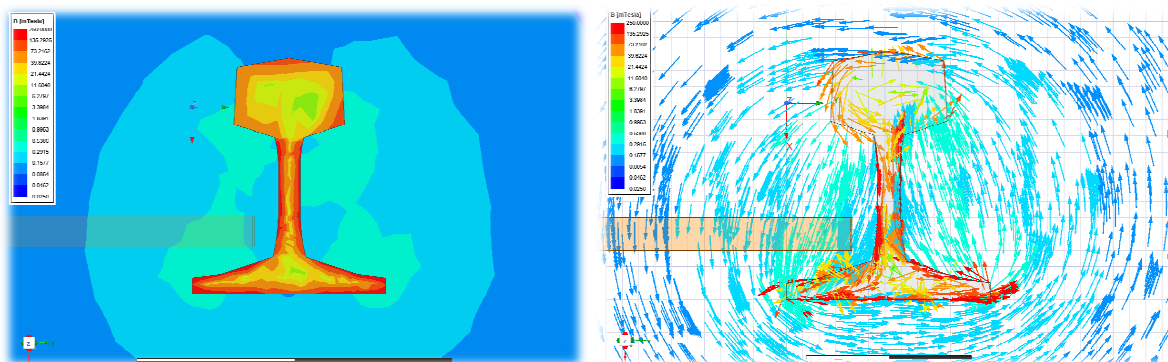
Konstrukčně nejjednodušším i když málo robustním řešením je vzduchová indukční cívka vedle kolejnice (obr.40), resp. mezi nimi. Přestože byla již při počátečním rozhodování vyřazena, udělal jsem simulaci i pro ní.



Obr.40 – Indukční cívka vedle kolejnice

Pro cívku 20x20cm vychází se simulace citlivost $U_i = 2,37$ mV. Pro větší cívku 20 x 50 cm vychází citlivost na $U_i = 2,29$ mV, bude-li položena delší stranou napříč kolejnice, a $U_i = 5,94$ mV, bude-li položena podél. Celkově větší cívka 50 x 50 cm pak dosáhne citlivosti 8,12 mV. Z hlediska citlivosti na závit je to velmi pěkné řešení, ovšem kromě robustnosti je na každý závit potřeba mnohem více drátu než u cívky s ocelovým jádrem.

Nemá žádné jádro a neteče s ní žádný proud, takže nikterak nenarušuje magnetické pole kolejnice a tak následující rozložení pole na obr.41 odpovídá též poli samotné kolejnice.

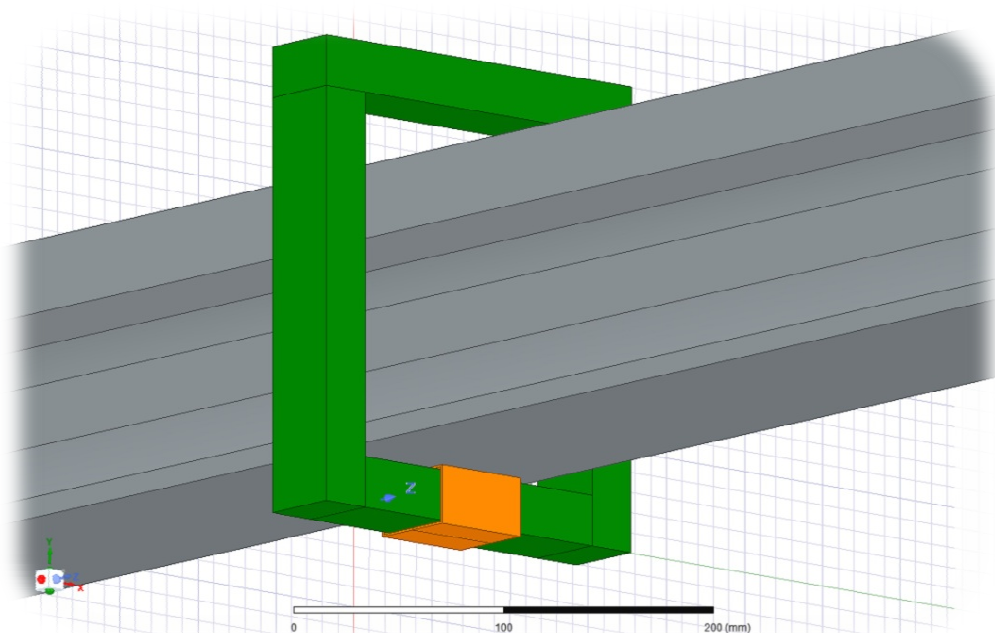


Obr.41 – Magnetické pole se vzduchovou cívkou

4.8.6 Proudový transformátor

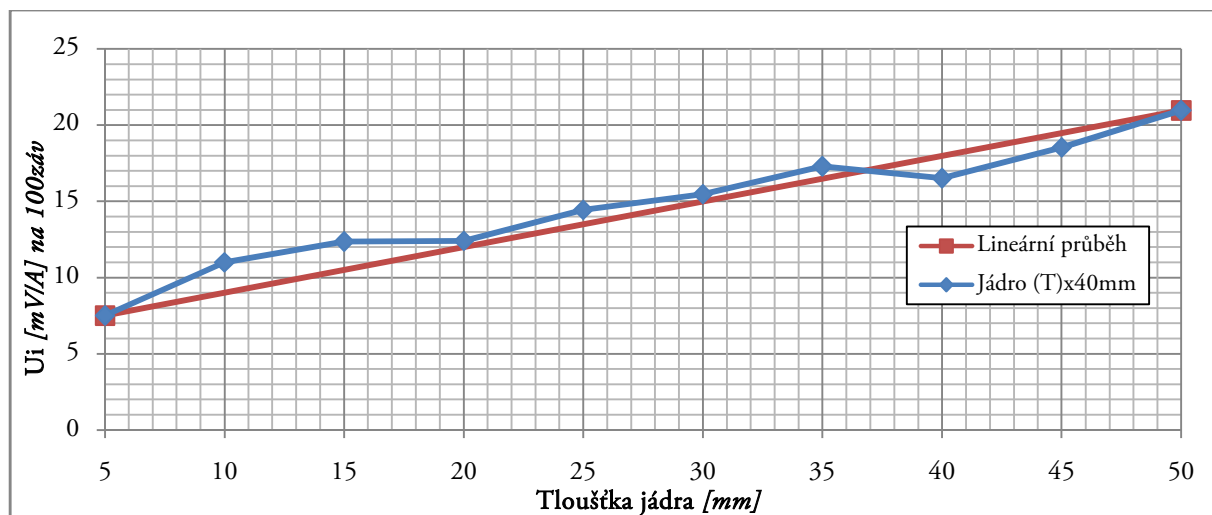
Tato část práce je neveřejná a je obsažena v technické zprávě pro zadavatele.

4.8.7 Uzavřené jádro kolem celé kolejnice

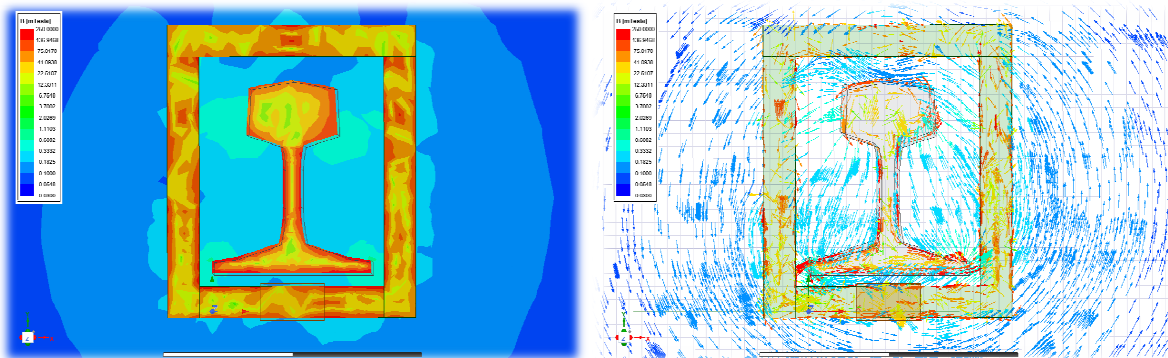


Obr.46 – Uzavřené jádro kolem celé kolejnice

Poslední zajímavostí pro srovnání dosažitelné napěťové citlivosti je uzavřené jádro okolo celé kolejnice. Z grafu na obr.47 je například vidět, že citlivost 12,4 mV u jádra tloušťky 20 mm je srovnatelná s uzavřeným jádrem jen přes půlku kolejnice z kapitoly 4.8.3 a snadno instalovatelný univerzální snímač dosahuje 8,74 mV (70 %) i s otevřeným jádrem.



Obr.47 – Graf závislosti indukovaného napětí na tloušťce uzavřeného jádra



Obr.48 – Rozložení pole uzavřeného jádra 25mm

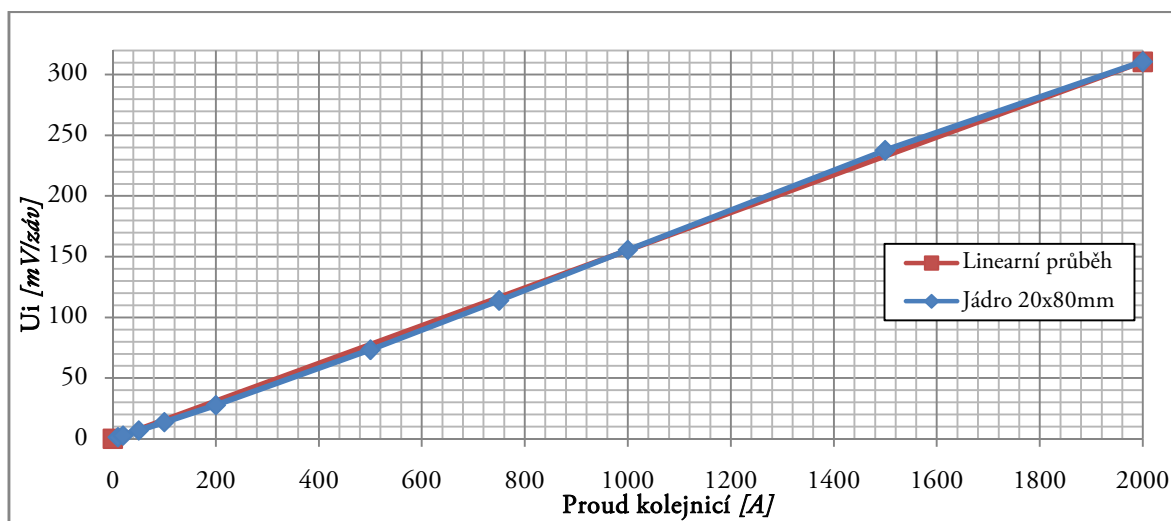
4.9 Vylepšení univerzálního tvaru

Tato část práce je nevěřejná a je obsažena v technické zprávě pro zadavatele.

4.10 Sycení jádra a závislost na frekvenci

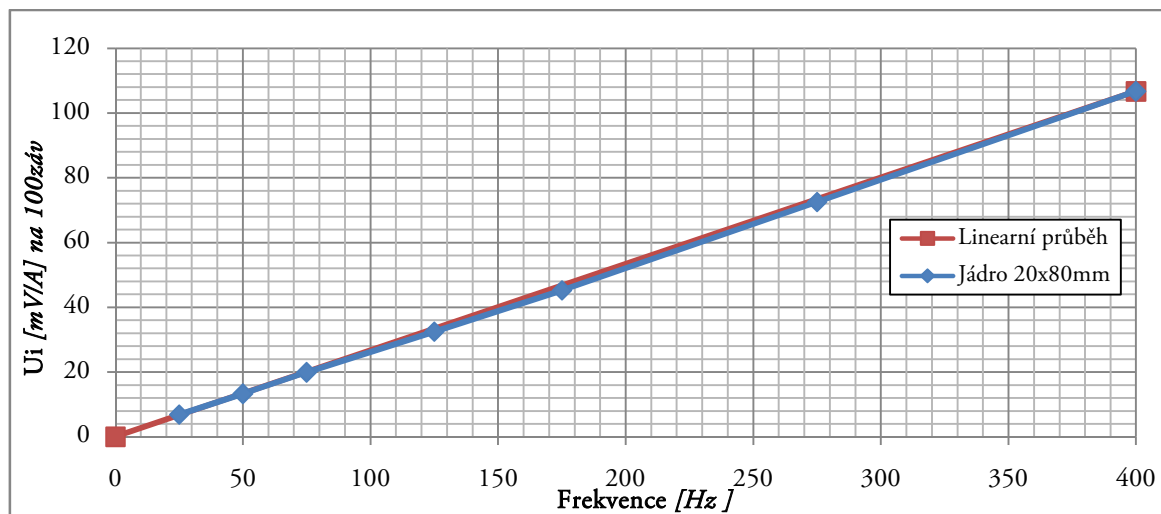
Zásadním projevem přesycení je pokles μ_r natolik, že magnetické pole začne vybíhat ven z jádra senzoru, nebude už procházet cívkou a tím výrazně klesne citlivost indukovaného napětí na další zvyšování proudu. Pro zjednodušení se u magnetických plechů udávají ztráty pro očekávané nominální magnetické sycení. Zásadní rozdíl v sycení je při 2000 A= (obr.53) a 2000 A~ 50Hz.

Zatímco stejnosměrným proudem se sytí celý objem kolejničky, střídavé magnetické pole je v důsledku skin efektu vytlačováno k povrchu kolejničky. Ani v tomto případě nepřesáhne sycení jádra kritickou hodnotu. Potvrzuje to i parametrická simulace závislosti indukovaného napětí na proudu kolejniček na obr.55, kde není až do 2000A patrný pokles citlivosti.



Obr.55 – Graf závislosti indukovaného napětí na proudu kolejniček

Další zvyšování frekvence už rozložení magnetického pole výrazně neovlivňuje. Pole při frekvenci 50 Hz je skoro stejné jako při 400 Hz. Potvrzuje to i parametrická simulace indukovaného napětí na frekvenci (obr.57), které roste lineárně s frekvencí, přesně podle indukčního zákona. Přesto ve skutečné konstrukci lze očekávat mírný pokles vlivem ztrát.



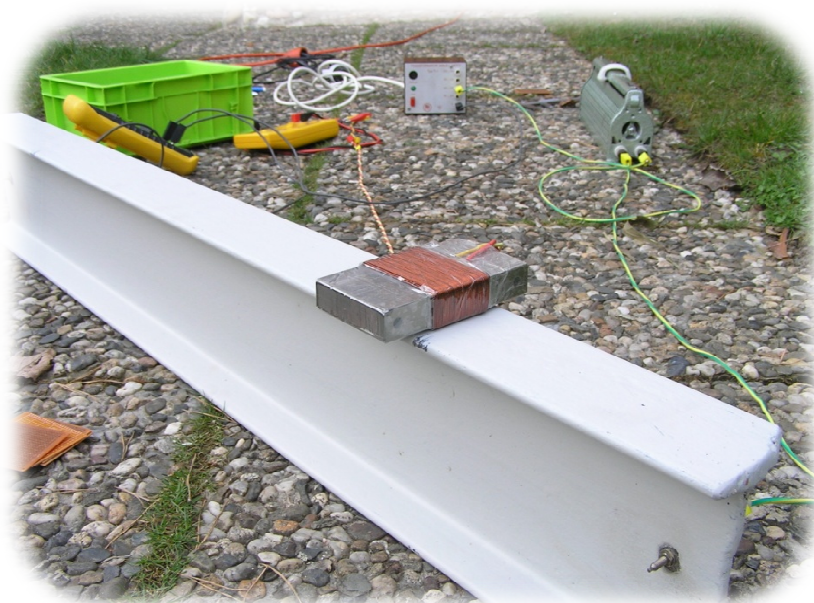
Obr.57 – Graf závislosti indukovaného napětí na frekvenci při 100A

Tím senzor vyhověl všem technickým požadavkům kromě citlivosti. Tu má se stále jen 13 mV/A, ale úpravou počtu závitů se dostaneme na 130 mV/A. Kromě toho indukční cívka není zatížena a její průřez může být libovolný pouze s ohledem na zatěžovací impedanci. Bude-li tato v řádu k Ω , měl by být odpor cívky maximálně v řádu stovek Ω .

5. REALIZACE A VÝSLEDKY MĚŘENÍ

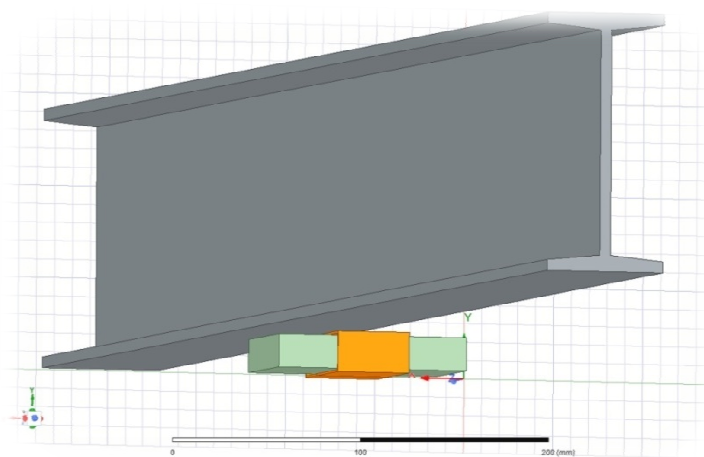
5.1 Měření na traverze a porovnání se simulací

Tento pokus jsem provedl už během prvních simulací kolejového senzoru, abych si ověřil, jak moc simulované hodnoty odpovídají realitě a kterým směrem lze očekávat případnou chybu. Protože jsem ještě neměl k dispozici ani kolejnici ani tvarový senzor, udělal jsem pokusné měření na nejpodobnější konfiguraci, jakou jsem dokázal postavit. A to za pomoci traverzy I a cívky 100 závitů lakovaným drátem 0,6 mm na I části EI jádra transformátoru z mikrovlnné trouby, o rozměrech 18 x 60 x 105 mm.



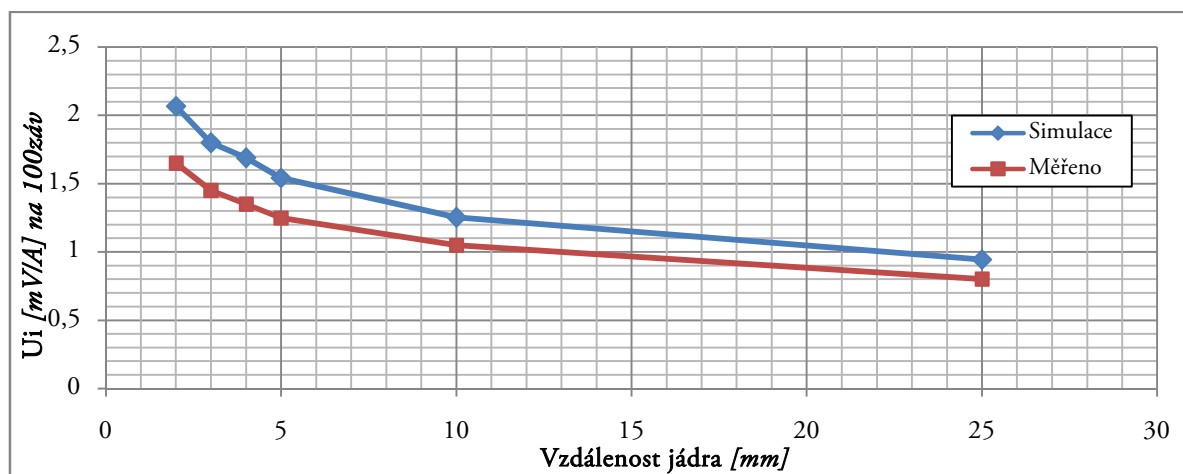
Obr.60 – Testování citlivosti senzoru na traverze

Traverzu jsem za tímto účelem na koncích doplnil šroubovými svorkami pro připojení vodičů. Proud 2 A- 50 Hz zajišťoval malý síťový transformátoček přes reostat. Pak jsem udělal simulaci přesně stejné konfigurace v Maxwellu 3D. V obou případech se mění vzdálenost jádra od traverzy.



Obr.61 – Model senzoru s traverzou v Maxwellu

Výsledek měření vyšel překvapivě dobře. Hodnoty z reálného měření jsou zhruba na 80% hodnot dosažených v simulaci a průběh závislosti napětí na vzdálenosti odpovídá.



Obr.62 – Graf závislosti indukovaného napětí na vzdálenosti jádra od traverzy

5.2 Návrh finálního tvaru pro výrobu

Tato část práce je neveřejná a je obsažena v technické zprávě pro zadavatele.

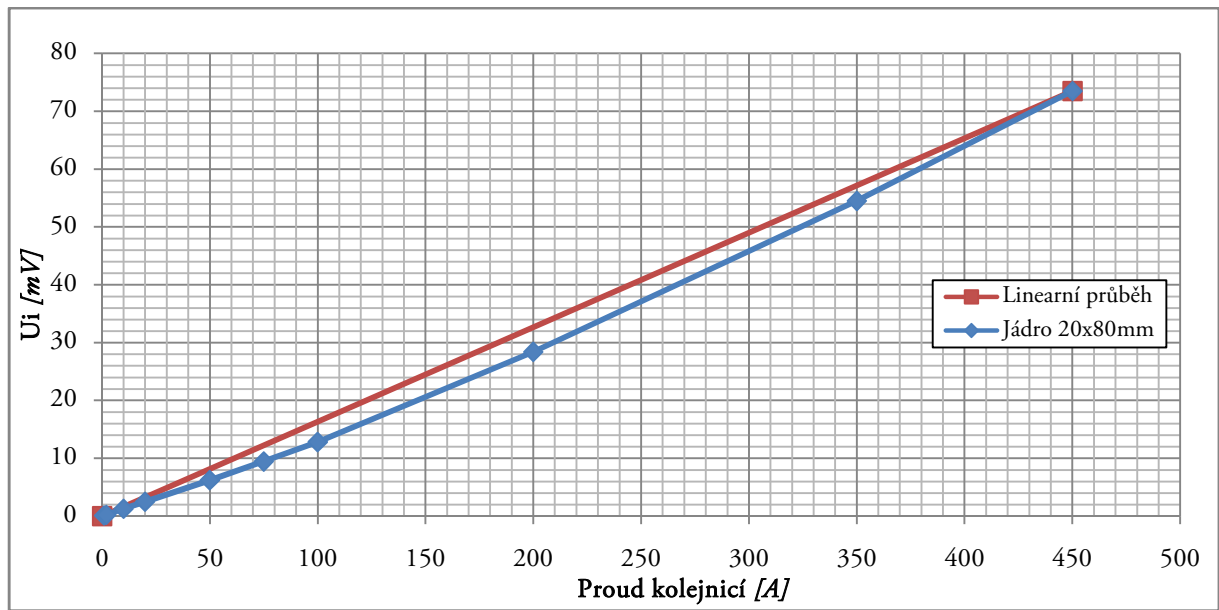
5.3 Návrh kostry cívky, 3D tisk a navíjení

Tato část práce je neveřejná a je obsažena v technické zprávě pro zadavatele.

5.4 Měření prototypu a úpravy

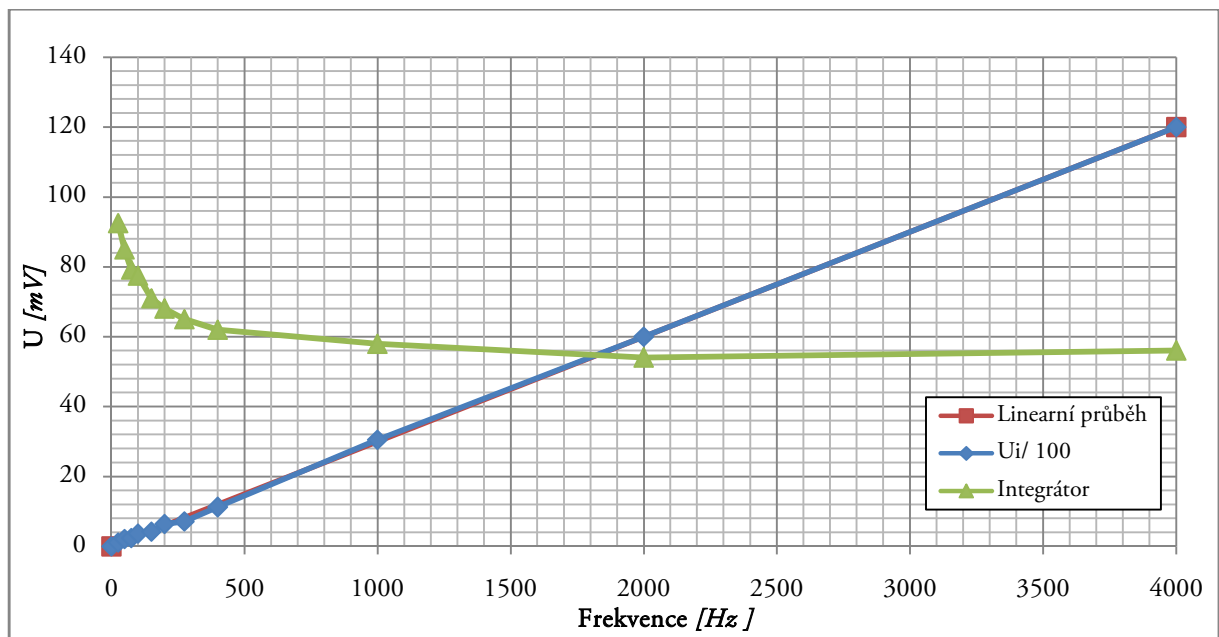
(Část obsahu této kapitoly je neveřejná a je obsažena v technické zprávě pro zadavatele.)

Cílem měření je zjistit zda bude navržená konfigurace svými vlastnostmi odpovídat simulaci. Ze simulace vychází citlivost navrženého senzoru 130 mV/A (amplituda), čemuž odpovídá efektivní hodnota 92mV/A. Sestavený prototyp dosáhl citlivosti 66 mV/A RMS, tedy 72 %. Úpravou počtu závitů bylo dosaženo 100 mV/A při 2 A~ 50 Hz. V následujícím grafu je vynesena změřená závislost indukovaného napětí na proudu při 50 Hz. Nárůst citlivosti s proudem je zde patrnější, než u simulace.



Obr.80 – Graf závislosti indukovaného napětí proudu kolejnicí

V dalším grafu je vynesena změřená závislost indukovaného napětí na frekvenci při proudu 2 A. Zeleně je vyneseno napětí na výstupu integrátoru zařazeného za cívku. Fázový posun mezi proudem kolejnicí a napětím na výstupu integrátoru je 10° v rozsahu 25 ÷ 400 Hz, při vyšších frekvencích začíná narůstat.



5.5 Návrh krytu

Tato část práce je neveřejná a je obsažena v technické zprávě pro zadavatele.

5.6 Měření na dráze

Tato část práce je neveřejná a je obsažena v technické zprávě pro zadavatele.

6. ZÁVĚR

V rámci této práce byl úspěšně navržen snímač pro měření elektrického proudu kolejnicí. Po důkladné rešerši metod snímání proudu a vyhodnocení jejich využitelnosti pro tento účel, byly provedeny simulace různých konfigurací snímače, ze kterých vznikl finální tvar univerzálního senzoru. Dále k němu byly navrženy potřebné konstrukční díly a byly vyrobeny 2 prototypy navrženého senzoru, u nichž byla dosažena citlivost 100 mV/A. Průběh změřené závislosti indukovaného napětí na proudu a frekvenci odpovídá simulovaným výsledkům. Dalším krokem bude integrace senzoru do liniového zabezpečovače na testovacím úseku a osvědčí-li se, bude následovat zavedení do sériové výroby.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] CHUDÁČEK, V., J. JAKL, L. LOCHMAN. *Vlakové zabezpečovací systémy*. Vyd. 1. Praha: ČD-VÚŽ, 1999. 67s. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18058928-Vlakove-zabezpecovaci-systemy-v-chudacek-j-jakl-l-lochman.html>
- [2] POUPĚ, Oldřich. *Zabezpečovací technika v železniční dopravě III*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství dopravy a strojů, 1970. 612s. UD: 31-059-70.
- [3] PALEČEK, Josef, Petr KAČOR, Martin MAREK. *Magnetická pole v okolí elektrizovaných drah*. In: *Časopis ELEKTRO 1/2010* [elektronicky]. Praha. [cit. 17.12.2020]. str.6-15 Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40261.pdf>
- [4] AŽD Praha s.r.o. [online katalogový list]. *DT-075E*. ©2017 [cit. 20.1.2021]. Dostupné z: <https://www.azd.cz/admin-data/storage/get/230->
- [5] HAASZ, Vladimír a kol.: *Elektrická měření, přístroje a metody*. Vyd. 3. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005. 337s. ISBN: 80-01-02731-7.
- [6] SAMIMI, Mohammad, Arash MAHARI. *The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review*. In: *IEEE Sensors Journal* 2014. Str. 651-658. JSEN: 2014-2362940.
- [7] Melexis [online katalogový list]. *MLX91216*. ©2021 [cit. 5.3.2021]. Dostupné z: <https://www.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/mlx91216-datasheet-melexis.pdf?la=en>
- [8] TE Connectivity [online katalogový list]. *KMZ20M*. ©2015 [cit. 5.3.2021]. Dostupné z: <https://www.te.com/global-en/product-G-MRCO-003.datasheet.pdf>
- [9] ANSOFT [online katalogový list]. *Maxwell 3D* ©2010 [cit. 20.9.2020]. Dostupné z: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V15.pdf
- [11] Kovin Trade [online katalog]. *Plechý a pásy pro elektrotechniku*. ©2020 [cit. 7.3.2021]. Dostupné z: <http://www.kovintrade.cz/prodejni-program/metalurgie/plechy-a-pasy-pro-elektrotechnicke-tepelne-zpracovani/>

ZDROJE OBRÁZKŮ

Obrázky, které zde nejsou uvedeny, jsou vlastní obrázky autora práce. (výsledky simulací, grafy, fotografie ze stavby a testování prototypu)

Obr.1 – Eurobalíza ABA systému ETCS L2 na Švestkové dráze AŽD

(<https://www.facebook.com/AZDPraha/photos/pcb.10157968882641407/10157968881636407>)
[cit. 5.11.2020])

Obr.2 – Izolované styky se stykovými transformátory v zastávce Praha-Libeň

(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Praha-Libe%C5%88%2C_zabezpe%C4%8Dovac%C3%AD_za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD.jpg)
[cit. 5.11.2020])

Obr.3 – Kolejový obvod

(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/76/Track_circuit.png) [cit. 12.11.2020])

Obr.4 – Stykový transformátor DT-075E AŽD Praha (<https://www.hledat.cz/detail-nabidky/342601-dt-075-e-stykovy-transformator#gallery-1>) [cit. 17.12.2020])

Obr.5 – Výkresy kolejnic

(https://rails.arcelormittal.com/ckeditor_assets/pictures/1294/content_uic60-60e1-profile.jpg ,
https://rails.arcelormittal.com/ckeditor_assets/pictures/1547/content_r65.png ,
<https://image.made-in-china.com/2f0j00coZRCSadGsbn/Carril-De-Ferrocarril-49e1-S49-54e1-60e1-Steel-Rail.jpg>) [cit. 17.12.2020])

Obr.6 – Náhradní schéma transformátoru (<https://core.ac.uk/download/pdf/94758358.pdf>)
[cit.20.01.202])

Obr.7 – Proudový transformátor (<https://www.electronics-tutorials.ws/wp-content/uploads/2018/05/transformer-trans53.gif>) [cit. 20.1.2021])

Obr.8 – Schéma Rogowského cívky s integrátorem

(https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/96/Rogowski_coil.png) [cit. 22.1.2021])

Obr.9 – MLX91216 pro měření proudu (původem z [7])

Obr.31 – Snímač LS90

(https://cs.wikipedia.org/wiki/Liniov%C3%BD_vlakov%C3%BD_zabezpe%C4%8Dova%C4%8D_LS#/media/Soubor:Ls90_snimac.JPG) [cit. 17.12.2020])