

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace detektoru kovů

**vedoucí práce: Doc. Ing. Vlastimil Beran CSc.
autor: Bc. Lukáš Beneda**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš BENEDA**
Osobní číslo: **E10N0004P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Optimalizace detektoru kovů**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište principy detektorů kovů.
2. Provedení a aplikace detektorů v praxi.
3. Popište zařízení firmy Loma Systems, s.r.o. a navrhňte optimalizaci zařízení s ohledem na výrobní technologie.
4. Provedte pokusy se stíněním cívek s ohledem na rušení vnějším okolím.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Wilhelm Rolf: Hledače kovů, HEL Ostrava 2003
2. Hledací technika pro profesionály, BEN 2002
3. Detektory kovů - návod na stavbu, BEN 2010
4. www.detektory.wz.cz

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Vlastimil Beran, CSc.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Cíle této diplomové práce jsou zaměřeny na specifickou skupinu detektorů kovů a to na detektory průmyslové. V úvodu je popsán princip využívaný v těchto zařízeních a jeho možné obměny. Tato práce vznikla díky spolupráci se společností Loma Systems s.r.o. Další částí práce je popis zařízení této společnosti a návrh optimalizace těchto zařízení. Hlavním bodem bylo vyšetřit průběh magnetického pole v detektoru a jeho okolí s ohledem na efektivní stínění.

Klíčová slova

Průmyslový detektor kovu, vysílací cívka, přijímací cívka, magnetické pole, elektrické pole, simulace polí, Ansys, citlivost, rušení detektoru.

Abstract

The objectives of this thesis are focused on a specific group of metal detectors, the industry metal detectors. There are the principles used in these devices and their possible variations described in the introduction. This thesis was developed in collaboration with Loma Systems Inc company. Another part is a description of the company's detector and proposal of design optimization of these devices. The main point was to investigate the distribution of the magnetic field in the detector and its area with concern to the effective shielding.

Key words

Industry metal detector, transmitter coil, receiver coil, magnetic field, electric field, simulation of fields, Ansys, sensitivity, disturbance of detector.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce je legální.

V Plzni dne 9.5.2012

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vlastimilu Beranovi, CSc. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce, dále panu Ing. Vladimíru Kindlovi Ph.D. a Ing. Jindřichu Kňourkovi za pomoc s programem Ansys, společnosti Loma Systems s.r.o. za poskytnutí materiálů, jejich zařízení a celkového zázemí pro řešení této práce a v neposlední řadě bych chtěl velmi ocenit přístup k výpočetním kapacitám MetaCentra poskytovaných v rámci programu "Projekty velkých infrastruktur pro výzkum, vývoj a inovace" LM2010005 financován Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ	9
ÚVOD	10
1 ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ PRINCIPY DETEKTORŮ KOVU	11
2 PRINCIPY AKTIVNÍCH ELEKTROMAGNETICKÝCH DETEKTORŮ KOVU	12
2.1 PRINCIP BALANČNÍCH DETEKTORŮ.....	12
3 ZAŘÍZENÍ SPOLEČNOSTI LOMA SYSTEMS S.R.O.	16
3.1 OBECNÉ INFORMACE	17
3.2 VYSÍLACÍ ČÁST - TX	17
3.3 PŘIJÍMACÍ ČÁST - RX	21
3.4 PRINCIP VYHODNOCOVÁNÍ.....	22
3.5 VYVAŽOVÁNÍ DETEKTORU	23
3.6 VÝSTUPNÍ KONTROLA	25
4 OPTIMALIZACE A STÍNĚNÍ DETEKTORU	27
4.1 VYŠETŘOVÁNÍ VLIVU POZICE RX VINUTÍ.....	28
4.1.1 <i>Preprocessing - příprava skriptu</i>	29
4.1.2 <i>Postprocessing - získávání výsledků</i>	31
4.1.3 <i>Hodnocení výsledků</i>	33
4.2 VYŠETŘOVÁNÍ MNOŽSTVÍ VYZAŘOVANÉ ENERGIE	43
4.2.1 <i>Řešení problému</i>	43
4.2.2 <i>Hodnocení výsledků</i>	46
5 ZÁVĚR	52
6 POUŽITÁ LITERATURA	53
7 PŘÍLOHY	1
7.1 TVORBA GEOMETRIE	1
7.2 DEFINICE ELEMENTŮ, MATERIÁLŮ A JEJICH PŘÍRAZENÍ K PLOCHÁM	2
7.3 SÍŤOVÁNÍ OBLASTÍ	4
7.4 OKRAJOVÁ PODMÍNKA A NASTAVENÍ BUDICÍHO PRŮBĚHU	4
7.5 NASTAVENÍ ANALÝZY	5
7.6 POSTPROCESSING	6
7.7 MAKRO	7
EVIDENČNÍ LIST	8

Seznam symbolů

DK (-).....	detektor kovů
f (Hz).....	frekvence
ω (s^{-1}).....	úhlová rychlost (frekvence)
ρ ($\Omega \cdot m$).....	měrný odpor
μ_0 ($H \cdot m^{-1}$).....	permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7}$)
μ_r (-).....	poměrná permeabilita
TR.....	transformátor
C (F).....	kapacita
Tx.....	transmitter - vysílač
Rx.....	receiver - přijímač
S/S.....	stainless steel - nerezová ocel
IQ ²	model detektoru společnosti Loma Systems s.r.o.
IQ ³	novější model detektoru společnosti Loma Systems s.r.o.

Úvod

Po zveřejnění bakalářské práce: Detektory kovů, projevila společnost Loma Systems s.r.o. zájem o spolupráci v oblasti výroby a vývoje průmyslových detektorů kovu.

Společnosti Loma a Cintex byly založeny před 30 lety a jsou předními světovými producenty v oblasti potravinových, farmaceutických a textilních kontrolních systémů – detektorů kovu, rentgenové kontroly a zařízení kontrolního vážení. Své prestižní postavení získaly díky své trvalé kvalitě a pokročilým technologiím, což je výsledkem neustálého a rozsáhlého výzkumného a vývojového programu.

Hlavní sídlo je ve Farnborough ve Velké Británii. Výzkumná a vývojová centra jsou jak ve Velké Británii, tak v Chicagu ve Spojených státech a nyní se zřizuje i zde v České republice. Většina výroby je ve Velké Británii a Chicagu, nyní se postupně přesouvá do nově zřízené provozovny v České republice (Dobřany). Společnost má také přímé prodejní a servisní zastoupení ve Francii, Německu, Nizozemí, Číně, Kanadě a USA. Mimo tyto oblasti těsně spolupracuje s distributory a podílí se výrobou a dodávkami součástek pro výrobce ve více než 35 zemích po celém světě, aby zajistila, že se zákazníkům dostává plného servisu a podpory, ať už se nacházejí kdekoliv [1].

Cílem společnosti je vytvoření kolektivu pracovníků v ČR, kteří se již v teorii detekce kovů orientují a jsou schopni pracovat na problémech a slabých stránkách výroby a podílet se na vývoji nových detektorů. Po dohodě byl vymezen okruh problémů, ve kterých by bylo vhodné provést určitá zlepšení jak po stránce technické, tak technologické, s ohledem na ekonomické úspory a zlepšení výrobního procesu.

V této práci je uveden popis principu stávajícího zařízení společnosti Loma Systems s.r.o., postup vyšetřování magnetického pole tohoto zařízení a návrh optimalizace z pohledu zlepšení kvality detekce a stínění elektromagnetického pole.

1 Základní fyzikální principy detektorů kovů

Principy detektorů kovů jsou založeny na využívání specifických vlastností kovů. Kovy se od okolních materiálů liší hlavně:

- měrným elektrickým odporem,
- magnetickými vlastnostmi.

Většina hledaných objektů je energeticky pasivní, proto je pro jejich detekci potřeba energii dodávat. Dodávaná energie je většinou vyzařována detektorem, částí, která má funkci vysílače. Vysílaná energie může být akustická, na tomto principu funguje sonar, nebo elektromagnetická, což je princip většiny detektorů, od radarů přes průmyslové detektory až k tzv. minohledáčkám. Zde se využívá výše jmenovaných odlišností, které mají vliv na pohlcenou, odráženou a zbytkovou energii, která je detekovaným objektem vyzařována zpět nebo jiným způsobem deformuje elektromagnetické pole. Množství pohlcené energie je dáno matematickým výrazem (1.1), který určuje tzv. hloubku vniku δ , ve které se přivedená energie vlivem vířivých proudů sníží na polovinu:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}} \quad (m) \quad (1.1)$$

kde: $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$

Výraz (1.1) je třeba uvažovat při řešení energie pohlcené nebo odrážené, z hlediska volby frekvence vysílané energie neboť:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (s^{-1}) \quad (1.2)$$

Druhou skupinu tvoří objekty, které do svého okolí nějakou formou energii vyzařují.

Vyzařovaná energie může být:

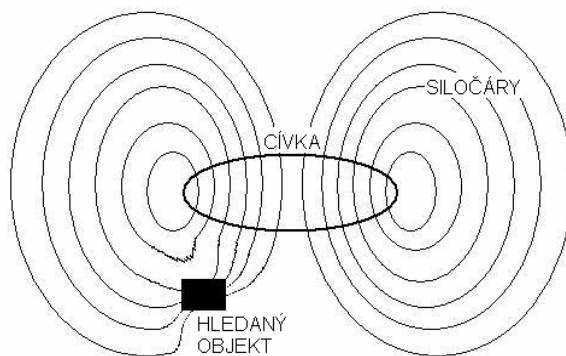
- akustická (lokalizování polohy ponorek),
- elektromagnetická (vyzařování většiny elektrických zařízení, točivých i netočivých, lokalizování letadel – systém TAMARA),
- tepelná (termovize, tepelné navádění řízených střel),
- gama záření (vyhledávání izotopů).

Zvláštním případem je situace, kdy hledaný objekt i detektor jsou pasivní a k detekci je využívána změna energie z cizího zdroje. Konkrétním případem je přístroj nazývaný

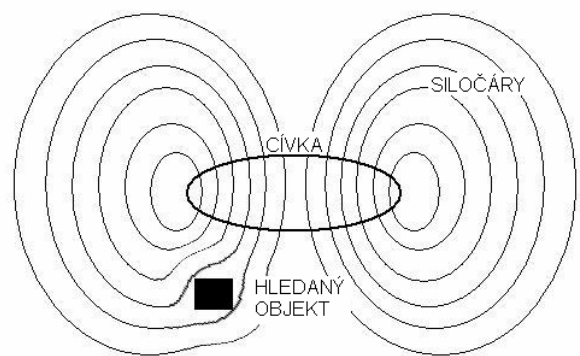
magnetometr, který detekuje objekty na základě změny intenzity magnetického pole země vyvolané hledaným objektem. Deformaci magnetického pole země nezpůsobují pouze kovy, ale i jiné nehomogenity jako jsou jeskyně, dutiny nebo remanentní magnetické pole [2].

2 Principy aktivních elektromagnetických detektorů kovu

Pro detekci jsou obecně využívány změny snímané veličiny, které jsou způsobeny hledaným předmětem, materiálem. Při vyhledávání objektů elektromagnetickým polem se využívá dvou materiálových vlastností způsobující jeho deformaci. Zprv je to deformace pole feromagnetickým materiálem (např. permaloy, ferit, železo), jehož magnetická vodivost převyšuje vodivost elektrickou a způsobuje soustředění siločar pole do objektu obr.: 2.1.



Obr. 2.1: Feromagnetický objekt



Obr. 2.2: Neferomagnetický objekt

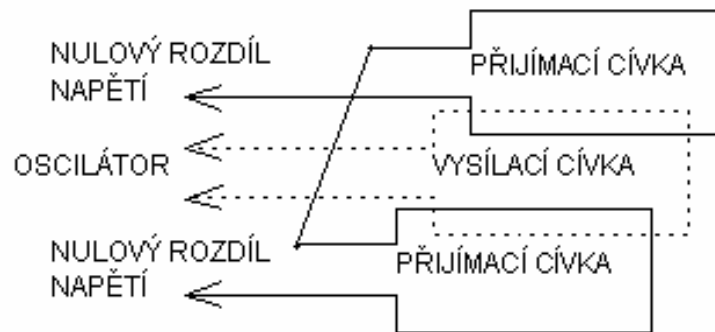
Materiály u kterých převyšuje elektrická vodivost nad magnetickou (např. měď, hliník) uplatňují druhý princip, a tím je deformace původního pole polem sekundárním. Sekundární pole vzniká vířivými proudy naindukovanými ve vodivém předmětu vystavenému původnímu poli. Ze zákona o zachování energie plyne, že sekundární pole působí proti původnímu. Následkem tohoto jevu dojde k obečení objektu siločarami původního vyzařovaného pole obr.: 2.2 [3].

2.1 Princip balančních detektorů

Většina průmyslových detektorů kovu pracuje na balančním principu, podrobný popis ostatních principů je uveden například ve [3].

Tento princip je založen na vyvážených (vybalancovaných) cívkách (IB – Induction Balance). Z toho plyne, že hledací sonda je složena z minimálně dvou cívek, popřípadě dvou systémů cívek, z nichž jeden je vysílací a druhý pracuje jako přijímač (Transmitter, Receiver – TR). Tyto detektory bývají označovány TR-IB. V případě dvou cívek je přijímací cívka

umístěna vzhledem k vysílací cívce tak, že naindukované napětí při nepřítomnosti kovu je rovno nule tzv. uspořádání překrývaných cívek tvaru "D". Stejného efektu lze dosáhnout při pozici cívek vzájemně pootočených o 90°. Jestliže je na straně příjmu soustava dvou cívek, umístí se vzhledem k vysílací cívce tak, že v nepřítomnosti kovu se do cívek indukuje stejně velké napětí, které se mezi sebou odečte. Rozdíl obou napětí na přijímacích cívkách je roven nule (obr.: 2.3).



Obr. 2.3: Uspořádání systému cívek

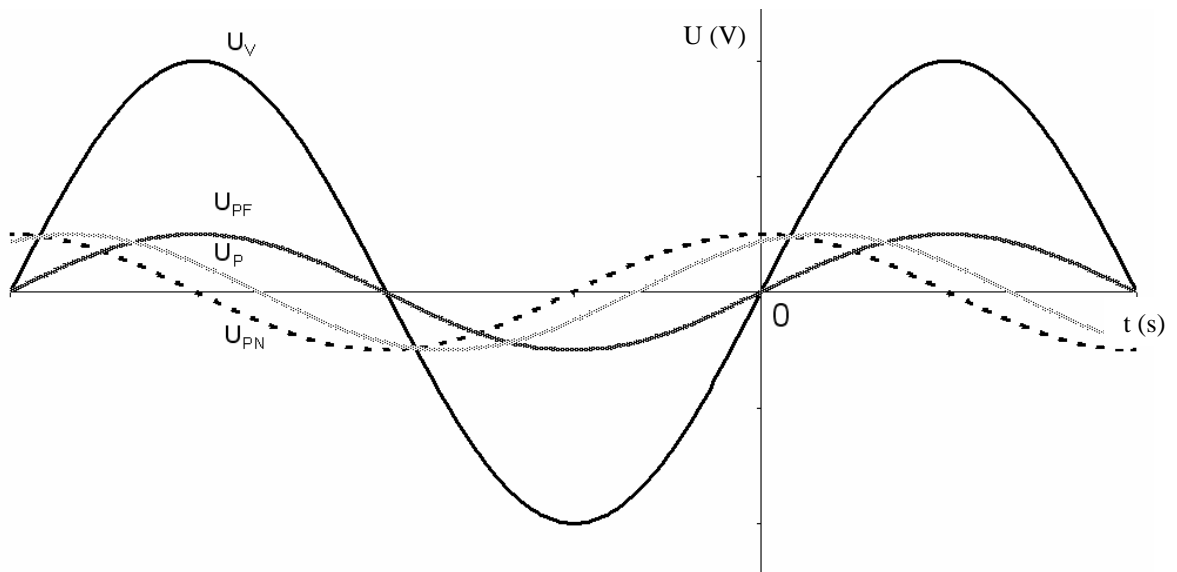
Jakákoliv deformace pole vysílací cívky má za následek porušení rovnováhy a na přijímací straně se objeví napětí indikující přítomnost kovu. Indukované napětí v přijímací cívce lze matematicky popsat vztahem (2.1).

$$U = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (2.1)$$

kde: A amplituda signálu
 ω úhlová frekvence signálu
 φ fázový posuv oproti vysílanému signálu

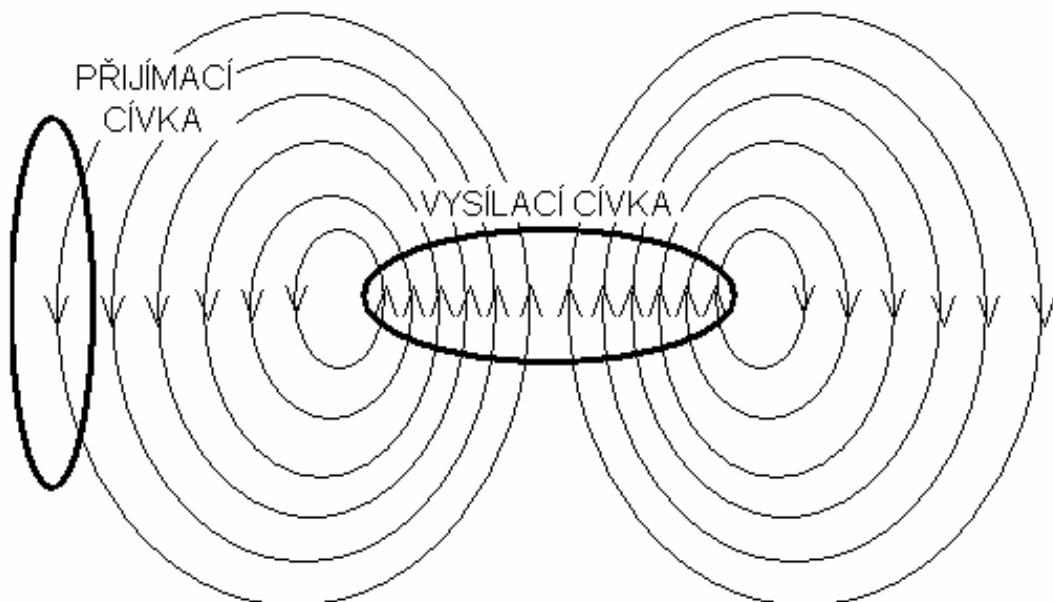
Pokud se pod cívkami nachází elektricky vodivý objekt z neferomagnetického materiálu, je pole deformováno sekundárním polem, způsobeným vířivými proudy, které působí proti poli původnímu. Pak přijímané napětí U_{PN} v přijímací cívce bude mít maximální hodnotu v okamžiku největší změny vysílaného napětí U_V . V případě indikace feromagnetického materiálu je indukované napětí U_{PF} ve fázi s vysílacím napětím. Protože je v praxi nemožné dosáhnout absolutního vyvážení cívek, bude v přijímací cívce vždy nějaké malé napětí. Na obr.: 2.4 jsou ideální přijímané signály pro různé druhy kontaminantů. U obecných materiálů se ve skutečnosti uplatňují jak feromagnetické vlastnosti, tak vodivostní. Z tohoto důvodu bude mít napětí U_P indukované v přijímací cívce fázový posuv oproti

vysílanému v intervalu $\left(0; \frac{\pi}{2}\right)$ [2].



Obr. 2.4: Průběhy napětí, U_V – vysílané napětí, U_{PF} – ideální přijímané napětí (feromagnetický materiál), U_{PN} – ideální přijímané napětí (neferomagnetický materiál), U_P – skutečné přijímané napětí [2]

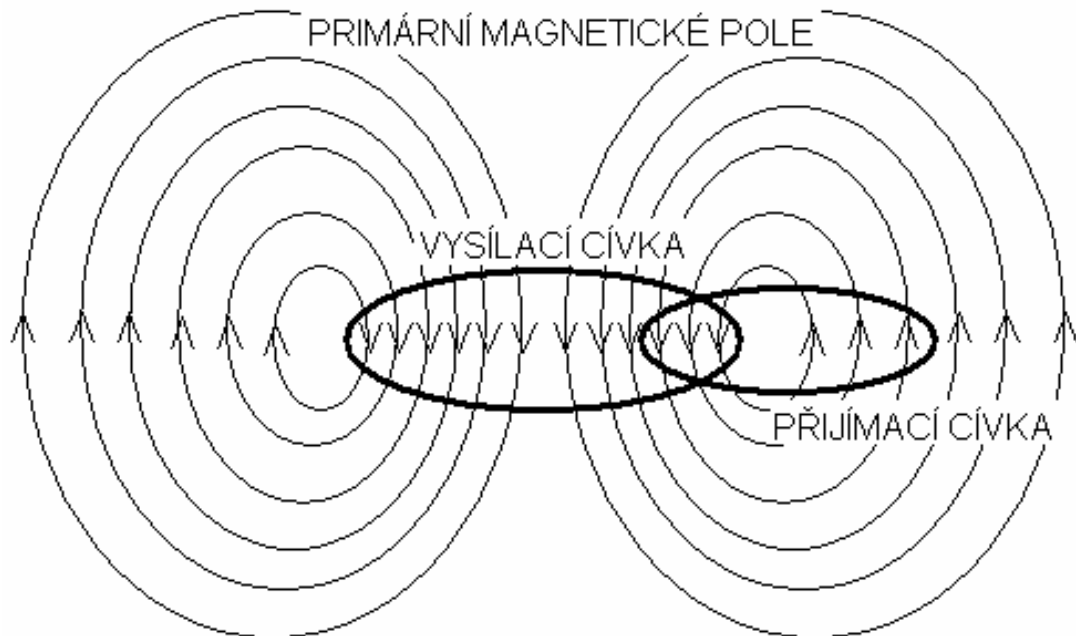
Existují různé možnosti docílení nulového klidového přenosu mezi cívkami. Zprvce prostorovým oddělením, kdy osy cívek mezi sebou svírají úhel 90° , vysílací cívka je uložena svisle a přijímací cívka vodorovně obr.: 2.5. Tyto detektory byly nazývány „Two box“ [2].



Obr. 2.5: Princip prostorového uspořádání 90° cívek [2]

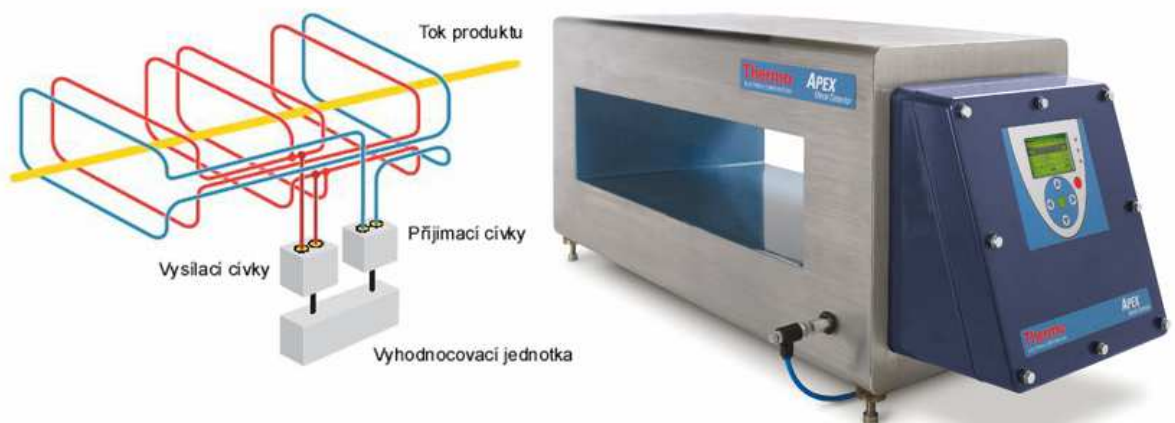
V druhém případě jsou obě cívky uloženy vodorovně, ale jejich prostorové uspořádání se volí takové, aby byla vzájemná indukčnost nulová. Toho je docíleno tím, že přijímací cívkou

prochází stejné množství siločar vysílací cívky v jednom i druhém směru a tím dochází ke kompenzaci (vyrušení) jejich účinku obr.: 2.6.

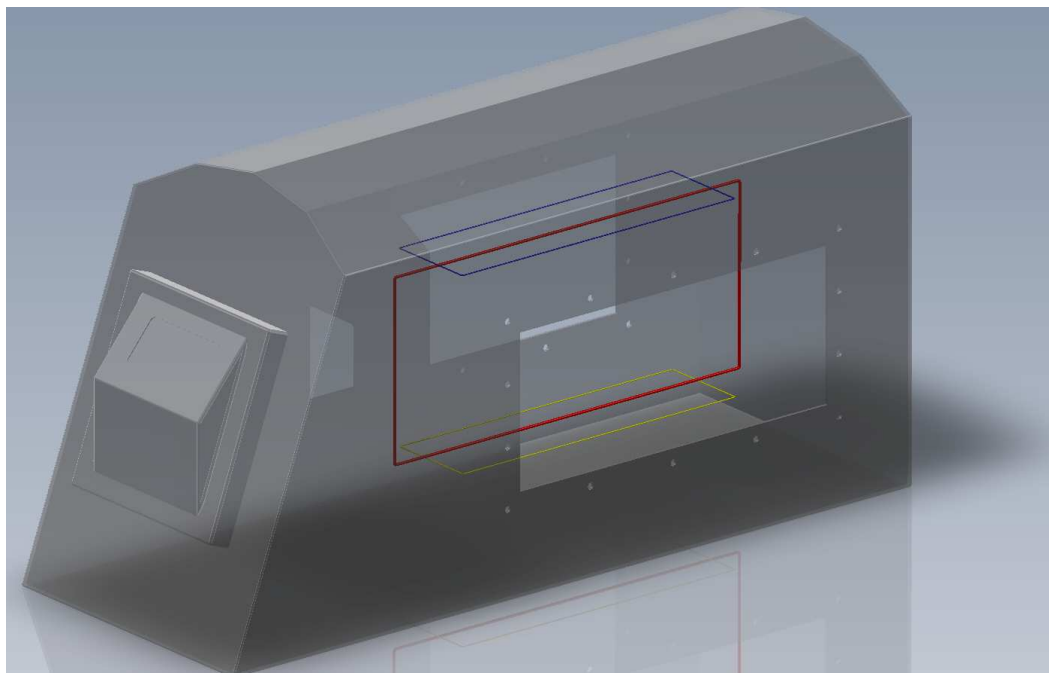


Obr. 2.6: Princip prostorového uspořádání překrývajících se cívek [2]

Společnosti vyrábějící průmyslové detektory kovů mají většinou své specifické uspořádání cívek.



Obr. 2.7: Více cívkové uspořádání detektoru společnosti Ad controls s.r.o. a jeho skutečné provedení [4]



Obr. 2.8: Tři cívkové uspořádání detektoru společnosti Loma Systems s.r.o.

Kvalita detektoru je dána především cívkovou soustavou a neměnností jejich vlastností a dále volbou pracovního kmitočtu. Špičkou mezi dnešními detektory jsou zařízení umožňující činnost při různých budících kmitočtech. Výhodou těchto systémů je možnost používat více zařízení blízko u sebe a hlavně možnost použití různých frekvencí pro rozdílné produkty s ohledem na citlivost a kvalitu detekce.

3 Zařízení společnosti Loma Systems s.r.o.

Podmínkou k další vývojové činnosti je podrobná znalost vyráběných zařízení a výrobních technologií v daném podniku.



Obr. 3.1: Detektor kovů IQ3 s dotykovým ovládáním společnosti Loma Systems s.r.o. [1]

3.1 Obecné informace

Jsou vyráběny dva typy detektorů, které pracují na stejném principu, ale liší se vysílacími průběhy budícího napětí a možnostmi pracovat na různých kmitočtech.

Starší model označený jako IQ² je vyráběný ve třech variantách jako farmaceutický detektor, detektor s volným propadem produktu nebo detektor s produktem dopravovaným potrubím. Poslední dva jmenované jsou také vyráběny na základě technologie IQ³. Tento systém umožňuje činnost detektoru na různých budících kmitočtech a je použit hlavně u dopravníkových detektorů. Detektor IQ² pracuje na neměnné frekvenci 1 MHz.

Dopravníkové detektory jsou vyráběny ve dvou variantách, normální (detekční otvor má stěny opatřené vrstvou modrého epoxidu) a detektory pro extrémně nepříznivé podmínky (stěny detekčního otvoru jsou pokryty odolným plastem), které odolávají i vysokotlakému vodnímu čištění. Obě varianty jsou vhodné i pro použití v potravinářském průmyslu.

Všechny detektory jsou schopny pracovat při síťovém napětí: 110/115/200/220/230 V 50 nebo 60 Hz 1f, 380/400 V 50/60 Hz 3f a mají stupeň krytí IP 69K, což umožňuje údržbu vysokotlakými vodními čističi. Ovládání a komunikace s detektorem je zajištěna LCD displejem s tlačítky nebo displejem dotykovým. Každý detektor je vybaven reléovými výstupy, jimiž je možno ovládat chod dopravníku, vyřazovací systém, signalizační lampy či klakson.

Detektor jako takový se skládá z jedné části, kde je jak samotný detekční otvor, tak i veškerá elektronika. Detekční otvor tvoří jádro z tvrzeného papíru (Tufnol), do kterého jsou vlepeny vodiče cívek. Stěny detekčního otvoru jsou opatřeny modrým epoxidem nebo bílým polyethylenem (Acetal), který má větší mechanickou odolnost. Celé zařízení je uzavřeno v obalu z nerezové oceli ANSI 304 (DIN 1.4301) tloušťky 3 mm. Prostor mezi jádrem a nerezovým obalem je vyplňován pěnivým epoxidem.

Elektronika detektoru obsahuje tři desky plošných spojů a ovládací displej. Hlavní částí je řídicí deska (Control board), na které se nachází blok napájecího zdroje, vyhodnocovací obvody, paměti, A/D převodníky signálu a vstupní/výstupní obvody. Dalšími částmi jsou vysílací deska (Transmitter board) a deska přijímače (Receiver board).

3.2 Vysílací část - Tx

Postupné upouštění od výroby zastaralé verze detektorů IQ² je důvodem pro zaměření této práce na detektory IQ³. Systém IQ³ je multifrekvenční, založený na balančním principu. Oproti standardním balančním detektorům je zde vysílací cívka buzena nespojitým signálem. Výhodou použití tohoto signálu je snadná změna frekvence, možnost řízení vysílacího výkonu

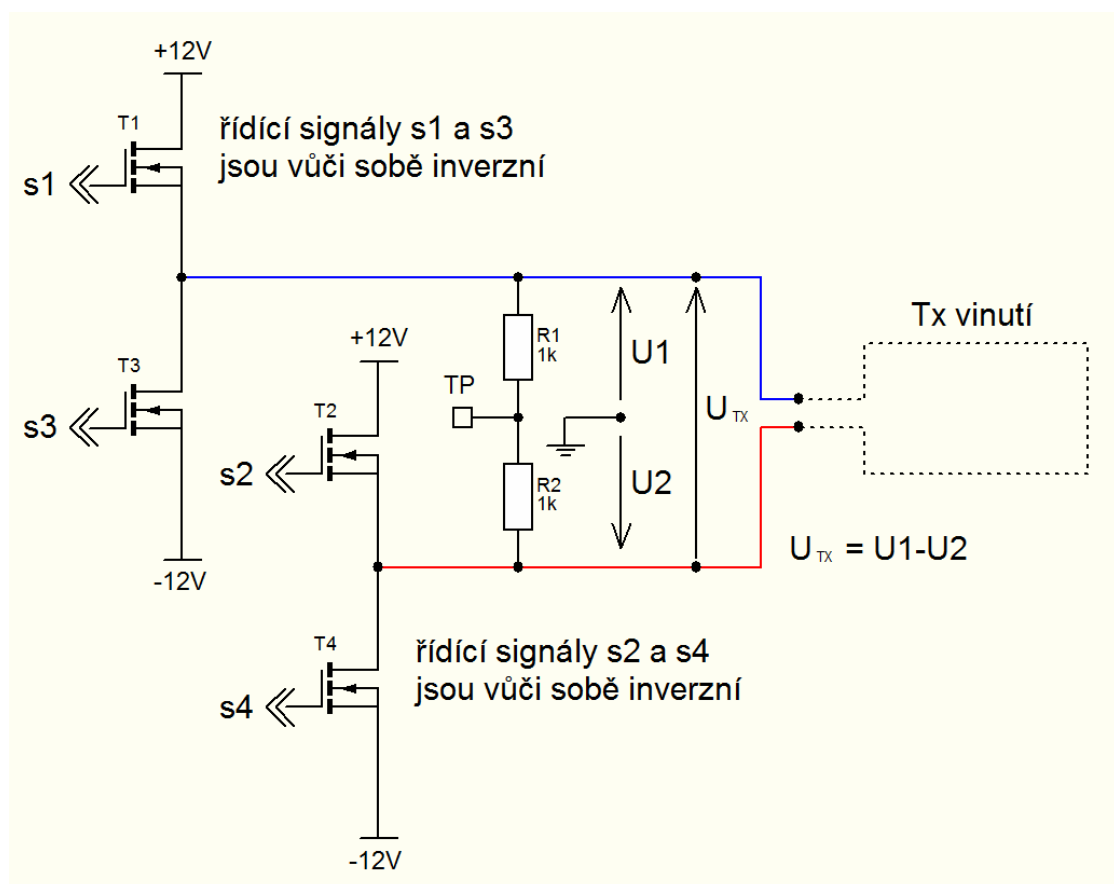
a celkové zvýšení kvality detekce, neboť rychlým změnám budícího proudu odpovídá velká změna magnetického indukčního toku. Dle Faradayova indukčního zákona je velikost indukovaného napětí dána rychlostí změny magnetického indukčního toku (3.1).

$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad (3.1)$$

Činnost Tx boardu (vysílací desky) je řízena mikrokontrolerem, který komunikuje s Control boardem sériovým rozhraním. Deska umožňuje kontrolu napájení, vysílacího proudu, teploty a případné přerušení Tx vinutí (vysílací cívky). Mikrokontroler řídí jak vysílací průběh, tak vyhodnocovací obvody, které jsou na Rx boardu (přijímací deska).

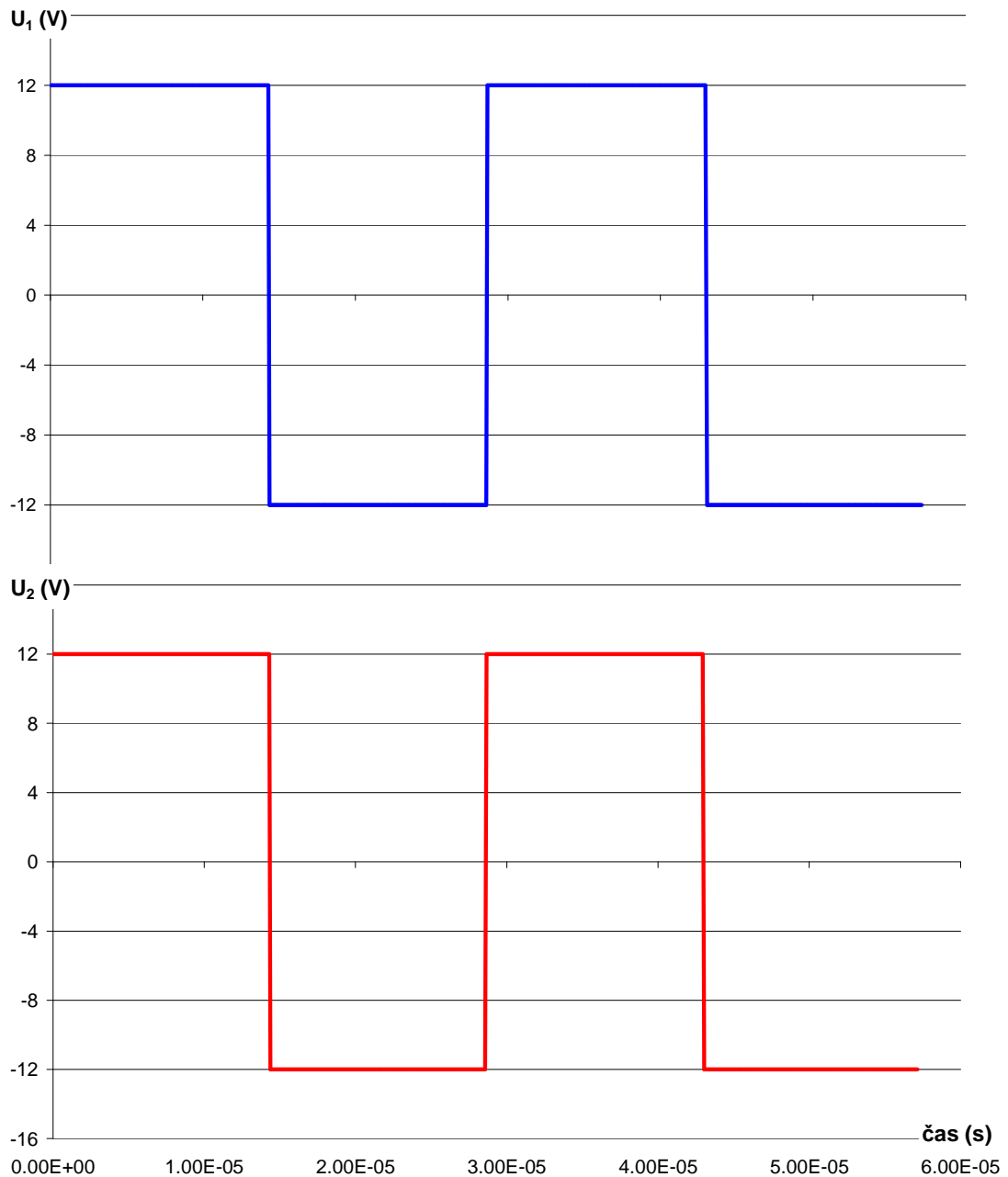
Na Tx board jsou přiváděna napětí 12 V, -12 V proti zemi, používaná k buzení Tx vinutí. Z kladného napětí se dále získává napětí 3,3 V a 1,8 V pro napájení ostatních obvodů. Budící signál je kvůli požadovanému vysokému pulsnímu výkonu odebírán z kondenzátorové baterie. Velikost odebíraného proudu je měřena operačním zesilovačem zapojeným jako převodník I/U.

Výkonová část Tx boardu je tvořena čtyřmi MOSFET tranzistory řízenými mikrokontrolerem. Výkonové tranzistory T1 až T4 jsou zapojeny dle obr.: 3.2.



Obr. 3.2: Zapojení koncové části vysílače

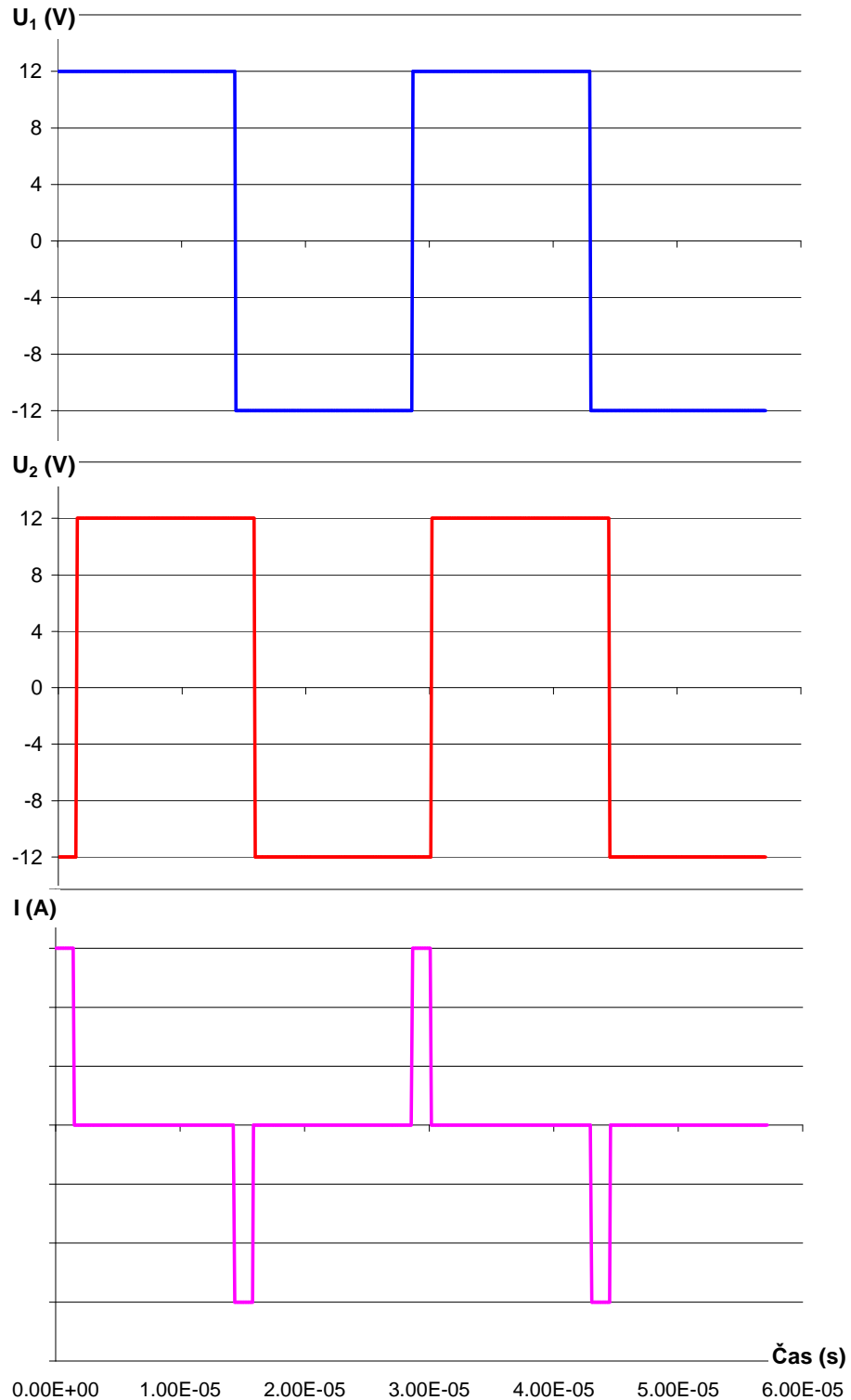
Vysílací cívka je tvořena pouze jedním závitem Cu drátu ϕ 1 mm, jeho indukčnost a kapacita je vzhledem k jeho vodivosti zanedbatelná a při nižších frekvencích se tedy chová jako zkrat. Pokud je časový posuv mezi U_1 a U_2 roven nule, pak napětí U_{TX} je také rovno nule a Tx cívkou neteče žádný proud obr.: 3.3.



Obr. 3.31. Průběhy signálů U_1 a U_2 přiváděných na vývody Tx vinutí

V detektoru by se dala naměřit pouze elektrická složka pole odpovídající původnímu signálu. Pro detekci kovu je však důležité elektromagnetické pole, která vzniká průchodem proudem vinutím. Proudového impulsu je dosaženo časovým posunem mezi napětími U_1 a U_2 přiváděnými na svorky Tx vinutí. V tomto případě potečou zkratové proudové pulsy,

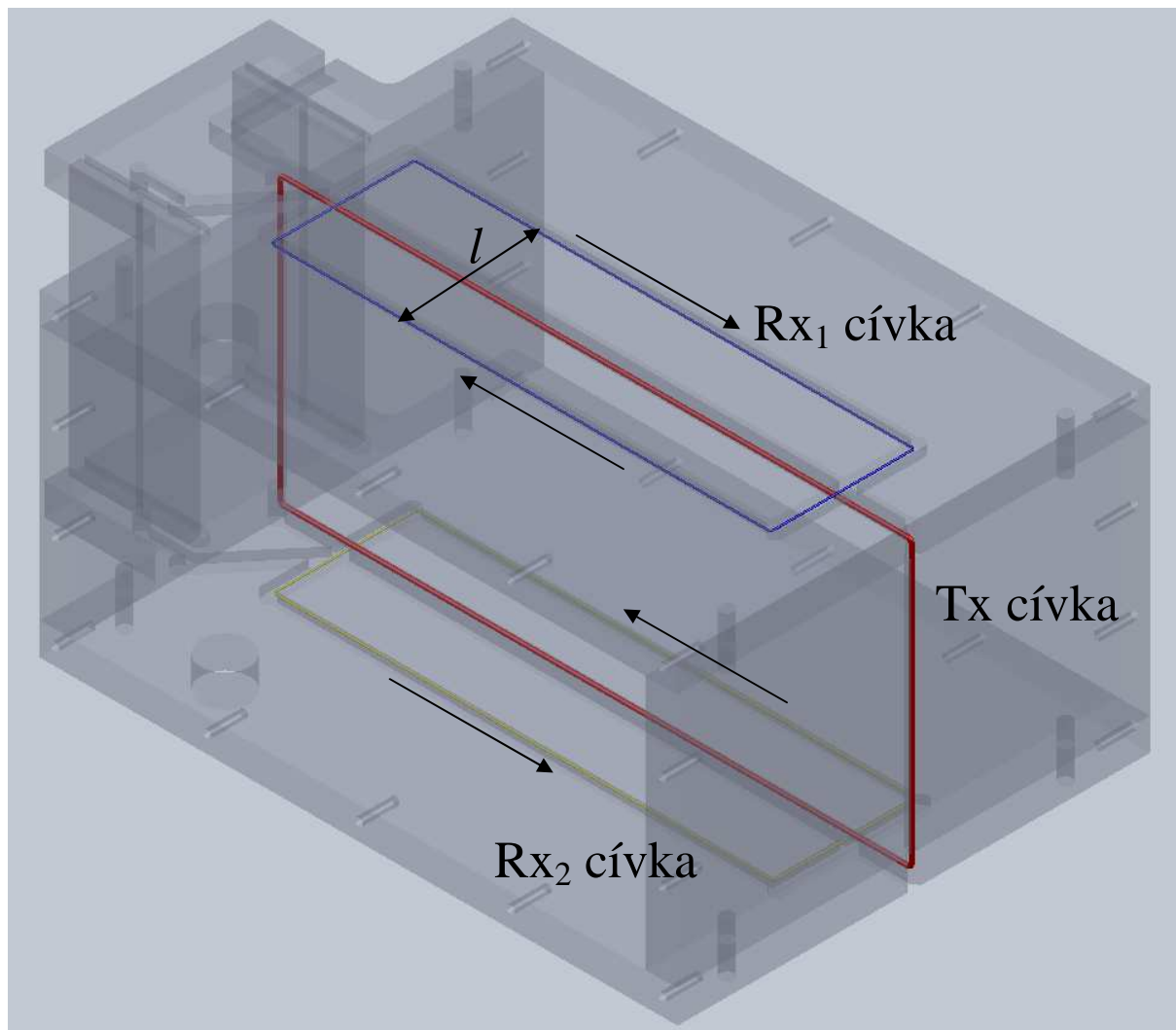
odpovídající připojenému napětí U_{TX} viz obr.: 3.4. Výkon detektoru je tedy řízen časovým posunem mezi průběhy napětí U_1 a U_2 . Tomuto časovému posuvu pak odpovídá i velikost odebíraného proudu do Tx vinutí.



Obr. 3.4: Časově posunutá napětí U_1 , U_2 přiváděná na vývody Tx vinutí a průběh proudu I v Tx vinutí

3.3 Přijímací část - Rx

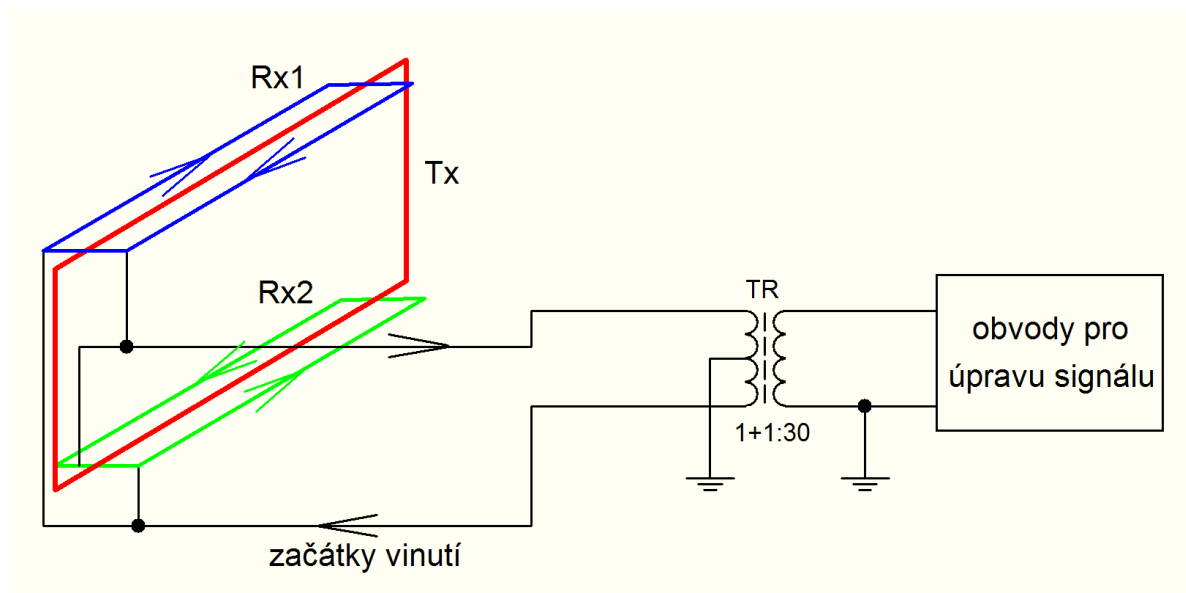
Základem přijímací části je soustava složená ze dvou paralelně spojených Rx cívek podle obr.: 3.5, každá se dvěma závity. U tohoto uspořádání hraje důležitou roli smysl vinutí Rx cívek (označení počátku a konce vinutí) a jejich přesná poloha. Tx musí procházet přesně v jedné polovině vzdálenosti l .



Obr. 3.5: Geometrické uspořádání je voleno tak, že pokud neprochází detektorem kontaminant, napětí indukované napájenou cívkou Tx do Rx cívek je minimální.

Jak bylo řečeno v kapitole 3.2, pro detekci kovu je podstatné elektromagnetické pole. Elektrické pole je odstraněno na primárním vinutí vstupního transformátoru TR s dvojitým primárním vinutím zapojeným proti sobě v poměru k sekundárnímu vinutí 1+1:30 umístěným na Rx boardu. Na obrázku 3.6 je zapojení vstupního obvodu Rx boardu. Elektrická složka pole má vůči zemi na obou vývodech Rx cívek stejný průběh. Primární vinutí TR má vyvedený střed na zem, čímž se elektrická složka pole uzemní (teče proud). Protože jsou

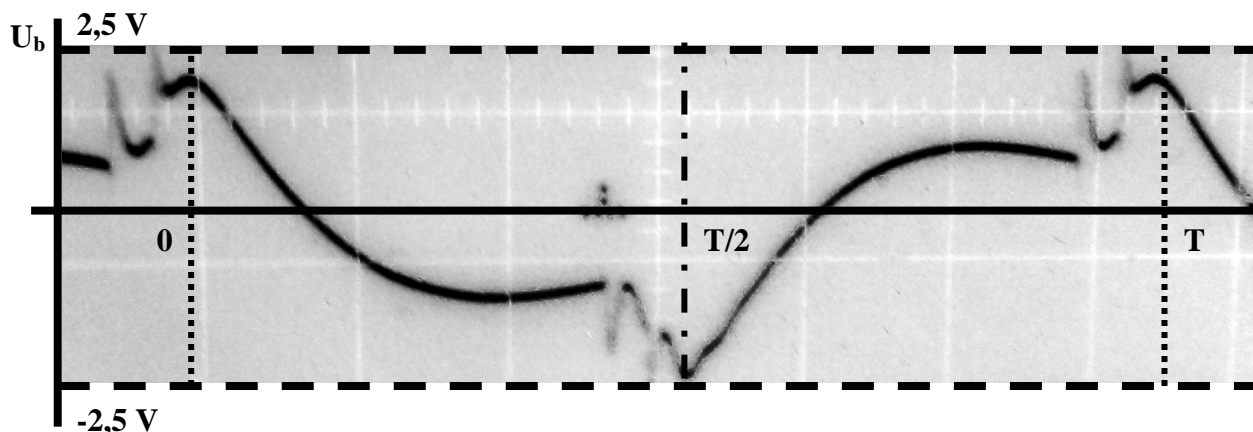
průběhy na obou vývodech stejné, magnetické toky v TR vyvolané proudem působí proti sobě a na sekundární vinutí se neindukuje žádné napětí. Dojde-li k narušení magnetického pole uvnitř detekčního prostoru, vzniká rozdíl naindukovaného napětí v levém a pravém vodiči Rx cívky. Tento rozdíl napětí má za následek tok proudu, který se uzavírá přes primární vinutí TR1 a indukuje napětí na sekundární straně. Toto napětí je dále zpracováváno.



Obr. 3.6: Vstupní obvod Rx boardu

3.4 Princip vyhodnocování

Signál na sekundárním vinutí transformátoru TR je zpracováván blokem obvodů pro úpravu signálu. Ten obsahuje aktivní filtr a integrační člen s nízko-šumovým operačním zesilovačem. Za integračním členem je měřicí bod, který je využit při oživování detektorů. Napětí U_b (balance signal) v tomto bodě se zobrazuje na osciloskopu a jeho maximální hodnota by neměla přesáhnout 6 V špička - špička. Čím je rozkmit toho napětí nižší, tím lze dosáhnout vyšší citlivosti detektoru (kap.: 3.5 Vyvažování detektoru). Nulového rozkmitu nelze dosáhnout mimo jiné kvůli výrobním tolerancím zařízení a nehomogenitám. Citlivost elektronických částí je velmi vysoká a uplatňují se rušivé vlivy při jejich činnosti (vliv teploty, mechanické chvění). Napětí U_b odpovídá vyrovnávacímu proudu v Rx cívkách. Příklad jeho průběhu bez kontaminantu je na obr.: 3.7.

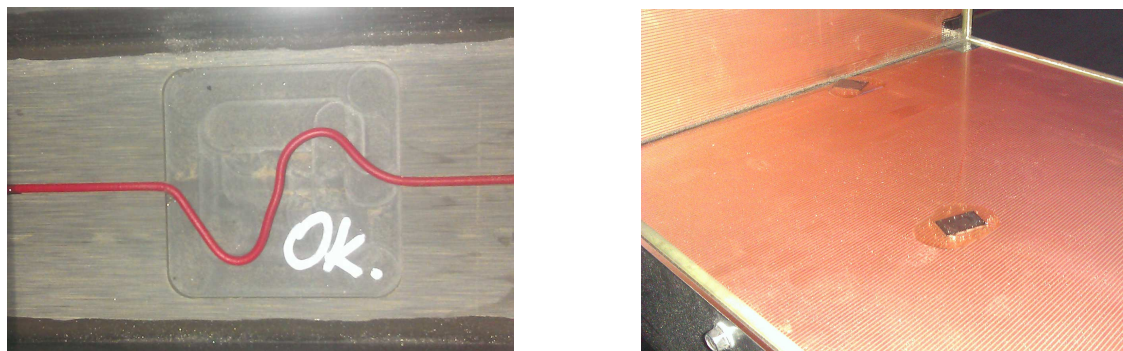
Obr. 3.7: Příklad průběhu napětí U_b

Napětí U_b je přiváděno na dva samostatné elektronické obvody (řízené usměrňovače), ovládané řídicími napětími z mikrokontroleru (na Tx boardu). Dvě řídicí napětí jednoho usměrňovače jsou vůči sobě o π posunuty a zároveň jsou posunuty o $\pi/2$ proti dvěma řídicím napětím druhého usměrňovače. Výsledkem jsou dva napěťové signály (P a Q), které jsou dále zpracovávány (integrace, zesílení) s možností ruční volby zesílení ve čtyřech stupních (ovládání citlivosti detektoru). Tyto signály jsou již nositelem informace a jsou na Control boardu převedeny do digitální podoby. Takto upravené signály jsou vyhodnocovány algoritmy v hlavním mikrokontroleru.

3.5 Vyvažování detektoru

Základem kvalitní a stabilní detekce je cívkový systém. Aby se dosáhlo co nejlepšího vyvážení cívek, je nutná přesná, bytelná a rozměrově stálá konstrukce. Detektory společnosti Loma Systems s.r.o. mají cívky uložené ve vyfrézovaných drážkách a zajištěné epoxidovým lepidlem. I přes to je detektor po osazení elektronikou značně nevyvážený, balanční napětí U_b překračuje požadovanou hodnotu 6 V špička - špička natolik, že může dojít i k saturaci elektronických obvodů. Je tedy nutné cívkový systém vyvážit (vybalancovat).

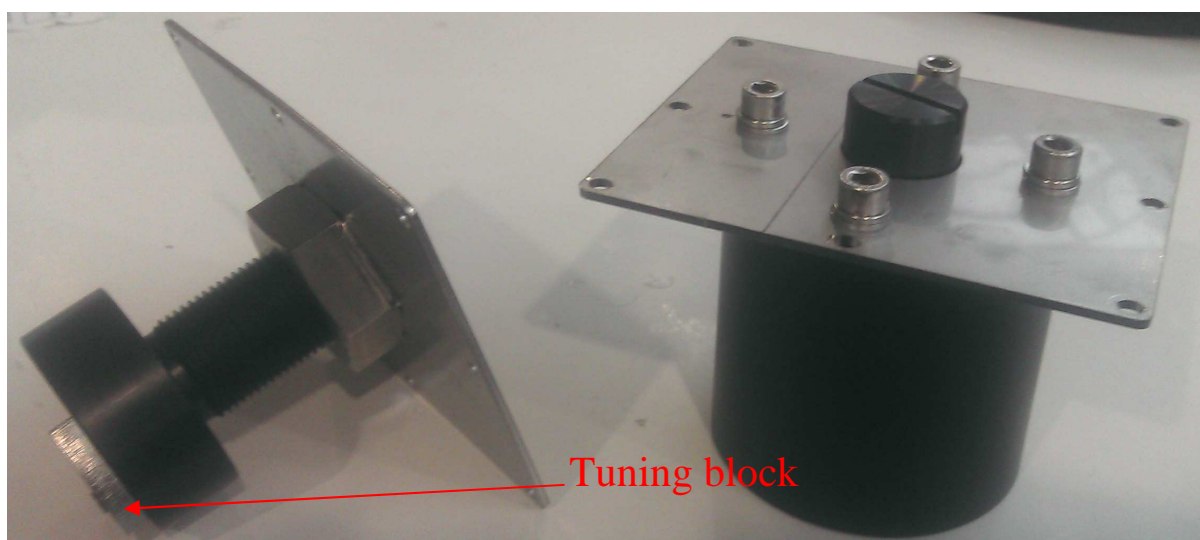
Nejprve se provede hrubé ladění spočívající v tvarování malé smyčky Tx vinutí v čele detektoru obr.: 3.8.



Obr. 3.8: Vyvažovací očko na Tx vinutí a vlepěný plíšek uvnitř detekčního otvoru

Tato smyčka plní funkci kompenzačního vinutí, po natvarování je očko zalité epoxidovým lepidlem. U detektorů s vnitřní úpravou detekčního otvoru modrým epoxidem se do detekčního otvoru dále vlepují vyvažovací plíšky různých tvarů a velikostí (od 1 cm² do 4 cm²) obr.: 3.8, které se následně zalijí do roviny modrým epoxidem. Jako materiál vyvažovacích plíšků je použita nerezová ocel ANSI 304 (DIN 1.4301) tloušťky 2 mm. Druhý typ detektorů s odolným plastovým povrchem (typ U.S.) neumožňuje vlepování plíšků dovnitř detekčního otvoru. Balancování se tedy provádí přesnějším tvarováním Tx očka, popřípadě vlepováním plíšků v jeho okolí.

Pro jemné doladění se u obou těchto variant (U.S. typ a klasický s modrou epoxidovou výplní detekčního otvoru) osazují balanční moduly obr.: 3.9, které na plastovém otočném dílu mají tuning block o rozměrech cca 0,5 cm² z 5 mm tlustého nerez. Oba balanční moduly umožňují pohyb tuning blocku v okolí vyvažovacího očka.

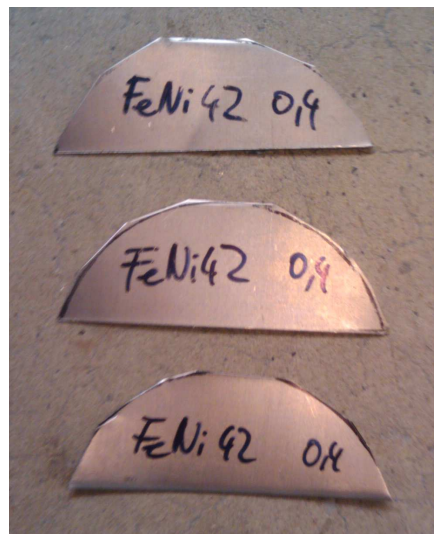


Obr. 3.9: Balanční moduly i s krycími plechy, vlevo U.S., vpravo klasický

Tyto moduly nejsou příliš efektivní a slouží pouze k mírnému vyvážení. Používají se dva typy

těchto modulů, podle varianty vnitřní výplně detektoru (U.S. typ a klasický s modrou epoxidovou výplní detekčního otvoru). Jedním z přijatých návrhů pro vylepšení detektorů s modrou epoxidovou výplní je použití stejného balančního modulu jako u detektoru typu U.S. Výrobní cena U.S. balančního modulu je podstatně nižší a umožňuje změnu polohy vyvažovacího dílu nejen po obvodu kružnice, ale i změnu vzdálenosti mezi rovinami očka a tuning bloku. Změna této vzdálenosti se využije v případě, kdy po osazení detektoru s modrou epoxidovou pryskyřicí balančním modulem dojde ke zhoršení vyvážení, které pouhým natočením po kružnici nelze vykompenzovat. Používáním pouze balančního modulu typu U.S. by se dosáhlo snížení počtu součástek ve výrobním procesu, snížení nákladů na výrobu detektoru s modrou epoxidovou výplní detekčního prostoru a odstranil by se i problém vznikající při osazení těchto detektorů balančními moduly.

Další návrh se týkal materiálu použitého na tuning block. Snahou bylo zvýšit vliv tuning bloku natolik, aby bylo možné vynechat kompenzační očko, čímž by došlo k urychlení ladění. Byly testovány materiály FeNi47In5 tloušťky 0,3 mm a FeNi42 tloušťky 0,4 mm. Byl zvolen tvar, který umožňoval použití stávajících U.S. modulů obr.: 3.10. Vliv tuning blocků se sice zvýšil, nicméně ne natolik, aby mohlo být vyvažovací očko zcela vynecháno.



Obr. 3.10: Prototypy tuning blocků z nových materiálů

3.6 Výstupní kontrola

Před samotnou expedicí detektoru je nutné provést kontrolu detekce. Kvalita detekce je ověřována třemi typy kontaminantů: neželezný - NONFE (mosaz), železný - FE (chromová ocel) a nerezový - S/S (ANSI 304). K tomu jsou určeny přípravky na obr.: 3.11 a 3.12. Jedná se o kuličky definovaných průměrů, které jsou zalité v plastových tyčinkách opatřených rozměrovou specifikací kontaminantu. Barva tyček odlišuje použitý typ kontaminantu.



Obr. 3.11: Testovací vzorky pro dopravníkové detektory



Obr. 3.12: Testovací vzorky pro farmaceutické detektory

4 Optimalizace a stínění detektoru

Jedním z bodů této práce je návrh optimalizací průmyslového detektoru kovu z hlediska kvality detekce a vyšetření elektromagnetického pole s ohledem na rušivé vlivy. Z počátku byly prováděny pokusy se stíněním cívek, s ohledem na rušení vnějším elektromagnetickým polem. První úvahy vedly k použití stínícího materiálu s velkou permeabilitou, který by do sebe soustředil větší množství indukčních čar unikajících do okolí a tím omezil vnější rušení. Na základě této úvahy byly testovány dva materiály FeNi47In5 tloušťky 0,3 mm a FeNi42 tloušťky 0,4 mm, které mohou dosahovat relativní permeability až $\mu_r 1,2 \cdot 10^6$ [5]. Těmito pokusy se sice snížilo množství indukčních čar magnetického pole unikajícího z detektoru, ale vlivem příliš velké permeability bylo ovlivněno i pole uvnitř detekčního prostoru, kde došlo ke snížení citlivosti. Tento návrh měl další negativní faktory, jako je vysoká cena použitých materiálů a omezené výrobní možnosti nedostačující šířkou pásů, což by vedlo ke skládání plechů vedle sebe a tím ke vzniku nehomogenit.

Aby byly optimalizace efektivní, je třeba znát rozložení elektromagnetického pole uvnitř detektoru a vlivy, které na něj působí. Proto bylo přistoupeno k využití počítačového softwaru Ansys. Jedná se o profesionální software založený na metodě konečných prvků. Je určen především pro simulace mechanického namáhání, ale umožňuje i řešení teplotních, elektromagnetických a sdružených polí [6]. Ansys byl vybrán především pro možnost řešení i 3D problémů. V této práci bylo z důvodů výpočetní náročnosti a velkého množství jednotlivých výpočtů přistoupeno k řešení problému pouze ve dvourozměrném prostoru. V tomto případě je řešeno nestacionární magnetické pole, které popisuje rovnice (4.1) [7]:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu} (\operatorname{rot} A - B_r) \right) + \gamma \frac{dA}{dt} - \gamma v \times \operatorname{rot} A = J_{ext} \quad (4.1)$$

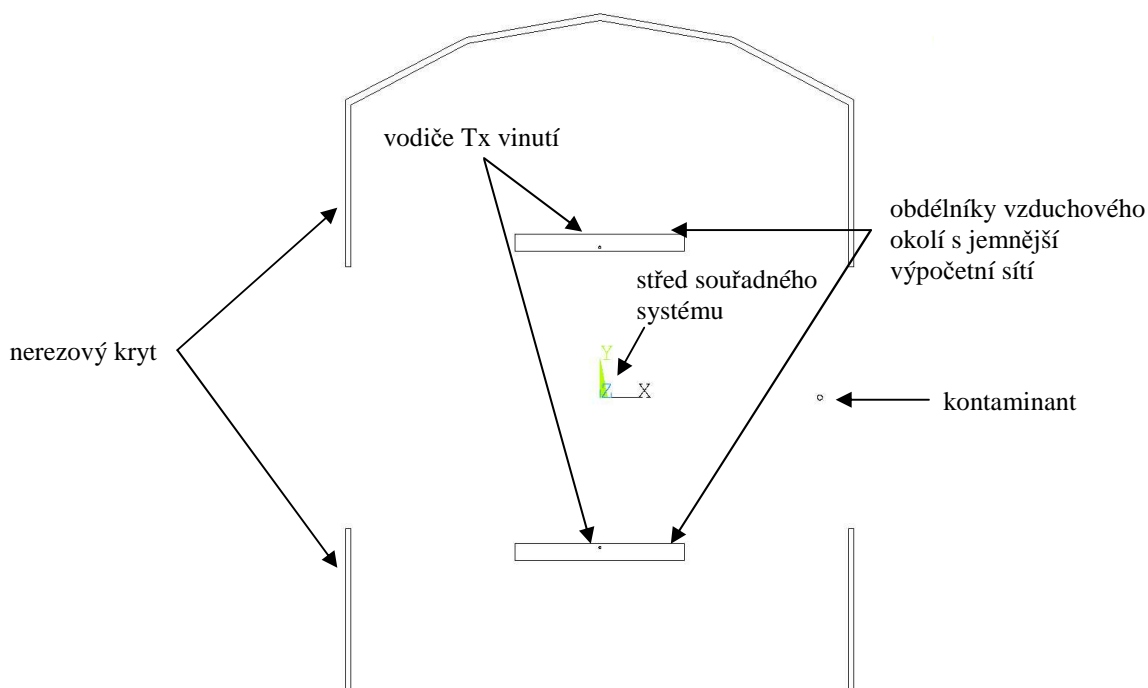
kde:

$$\operatorname{rot} A = B \quad (4.2)$$

- A... magnetický vektorový potenciál,
- μ ... permeabilita,
- B_r ... remanentní indukce,
- B... magnetická indukce,
- γ ... měrná elektrická vodivost,
- v ... rychlost pohybu tělesa v magnetickém poli,
- J_{ext} ... vektor vnější proudové hustoty.

4.1 Vyšetřování vlivu pozice Rx vinutí

Nejprve byly provedeny simulace stávajícího zařízení o rozměrech detekčního otvoru 150 mm x 350 mm. Základní geometrie problému je na obrázku 4.1. Pro řešení základního problému by bylo možné použít symetrii modelu, pokud však model doplníme o kontaminant, možnost této symetrie odpadá. Byly provedeny tři série výpočtů, které se lišily materiálem kontaminantu. Každá série se skládala z 24 samostatných výpočtů, ve kterých se postupně měnila pozice kontaminantu, tak jako je tomu při skutečné situaci na dopravním pásu. Použitým APDL skriptem by bylo možné řešit i průchody kontaminantu v různých výškách detekčního otvoru. Pro potřeby těchto výpočtů byl průchod zvolen středem, jelikož je zde citlivost detektoru nejnižší. Nutno poukázat na skutečnost, že kontaminant reprezentovaný kružnicí v řezu detektoru, nelze považovat za kulový, nýbrž za vodič kruhového průřezu stejné délky jako Tx, respektive Rx vinutí. Rozmezí pohybu kontaminantu bylo od -230 mm do 230 mm vůči Tx vinutí s krokem 20 mm. Obdélníky v okolí Tx vinutí byly vytvořeny za účelem možnosti zjemnění výpočetní sítě v prostoru Tx a Rx vinutí. Na obrázku: 4.1 nejsou namodelovány Rx cívky, neboť hodnota naindukovaného napětí byla získávána v pěti různých výškových pozicích a bylo hodnoceno indukované napětí U_i .



Obr. 4.1: Základní geometrie

4.1.1 Preprocessing - příprava skriptu

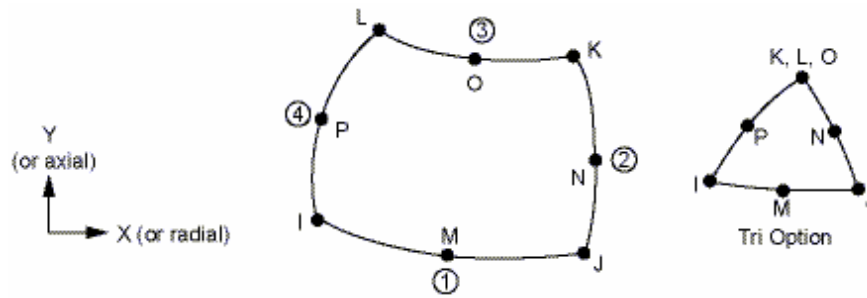
Nejprve bylo nutné zjistit geometrické rozměry a materiálové konstanty zkoumaného detektoru. Geometrické rozměry byly získány z databáze Solidworks modelů společnosti Loma Systems s.r.o. V kapitole 7.1 je úryvek APDL skriptu pro tvorbu geometrie.

Materiály použité v modelu jsou: vzduch, vodiče Tx vinutí, nerezový obal detektoru a materiály kontaminantů. V rámci zjednodušení modelu nebyly uvažovány PVC izolace Tx vinutí, samotné Tufnelové jádro a materiál, s nímž je prostor mezi jádrem a nerezovým krytem vyplněn, neboť tyto materiály vykazují z pohledu šíření elektromagnetického pole stejné vlastnosti jako vzduch. Konkrétní hodnoty materiálových konstant viz tabulka 4.1, odpor Tx vinutí nebyl uvažován, neboť jeho plochy byly zatíženy definovanou proudovou hustotou, tudíž není možné uvažovat případně naindukované vířivé proudy. Dále bylo nutné zvolit a správně nastavit použité elementy modelu.

Tab. 4.1: Materiálové vlastnosti

	měrná permeabilita [-]	měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot m$]
vzduch	1	-
Tx vinutí	1	-
nerezová ocel (ANSI 304, DIN 1.4301)	1,008 [10]	$7,20 \cdot 10^{-7}$
neželezný kontaminant (mosaz)	1	$7,50 \cdot 10^{-8}$
železný kontaminant (chromová ocel)	400	$1,20 \cdot 10^{-7}$
nerezový kontaminant (ANSI 304, DIN 1.4301)	1,008	$7,20 \cdot 10^{-7}$

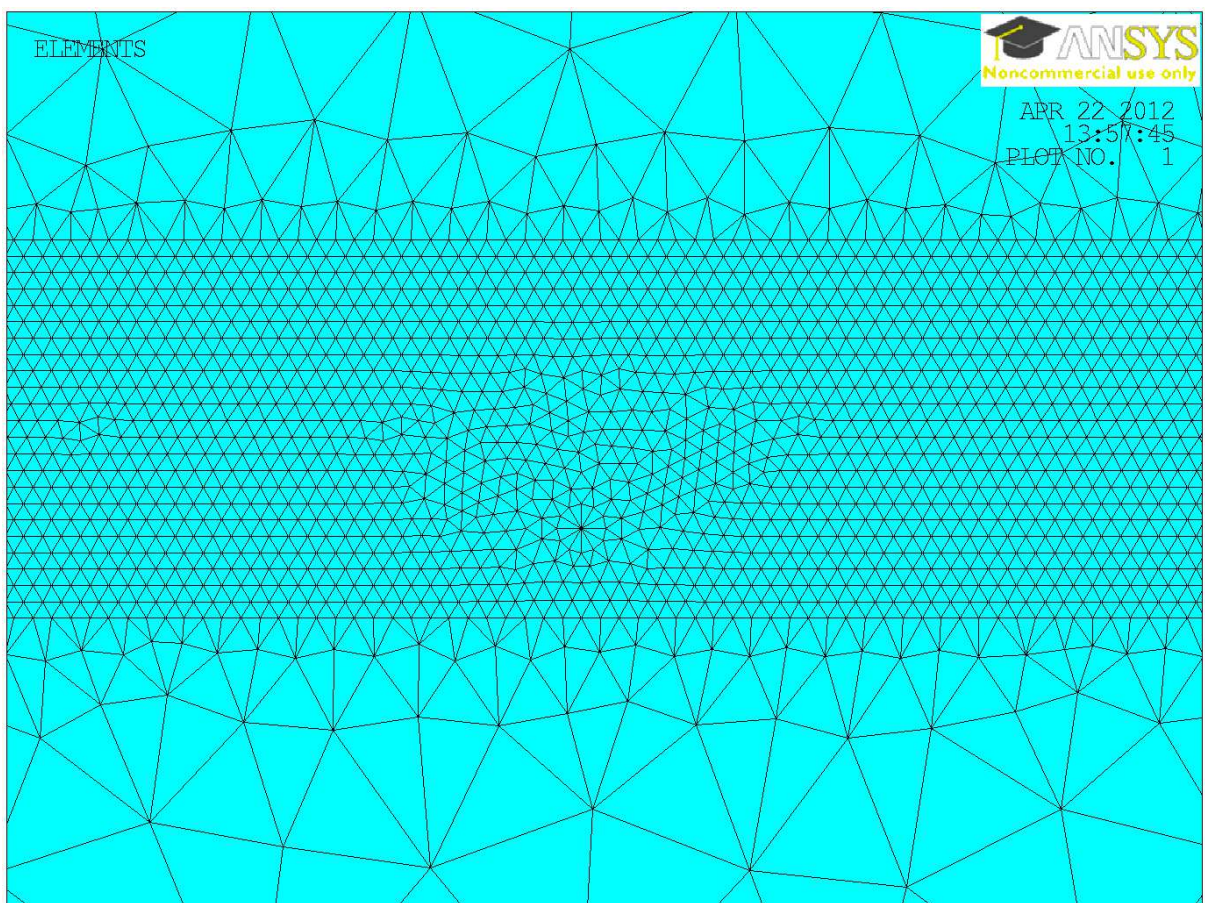
Jako elementy daného modelu byly zvoleny elementy PLANE53 určené pro řešení magnetického pole. Jedná se o osmi uzlové elementy, které mohou mít až čtyři stupně volnosti na uzlu. Stupně volnosti mohou být: magnetický vektorový potenciál (AZ), časově integrovaný elektrický skalární potenciál (VOLT), elektrický proud (CURR) a elektromotorická síla (EMF) [6]. Geometrie elementu na obr.: 4.2.



Obr. 4.2: Geometrie elementu PLANE53 [6]

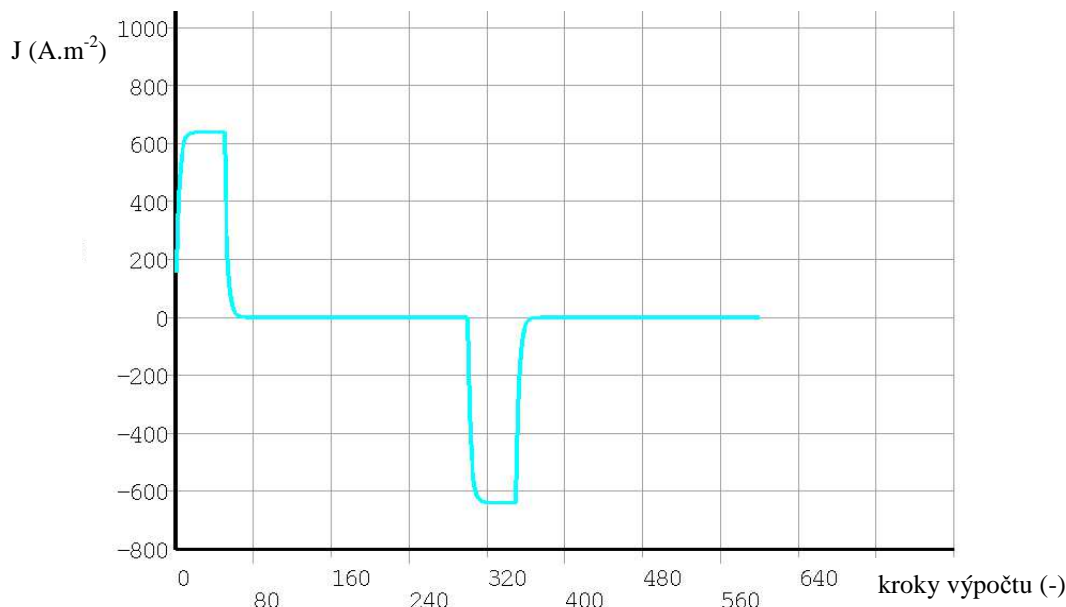
Úryvek kódu v kapitole 7.2 obsahuje definování materiálových vlastností, definování elementů a jejich nastavení. V další části, bylo nutné jednotlivé materiály a elementy přiřadit daným plochám.

Dále bylo zapotřebí nastavit atributy pro automatické síťování oblasti. Je nutné, aby v tenkých a malých plochách byla vyšší hustota sítě než na velkých plochách, kde postačuje síť řidší. Velmi důležitá je kompatibilita sítě, proto byla v okolí Tx vodičů vytvořena obdélníková oblast s hustší sítí, viz úryvek kódu v příloze 7.3.



Obr. 4.3: Detailní pohled na síť elementů

V poslední části preprocessingu byla definována Dirichletova okrajová podmínka udávající magnetický vektorový potenciál roven nule, na vnější hrany vzduchového okolí a průběh budící proudové hustoty v Tx vodičích. V horním a dolním vodiči měly toky opačný smysl, proto bylo nutné vytvořit dva vektory hodnot $J1$ (obr.: 4.4) a $mJ1$. V poslední řadě bylo provedeno přiřazení průběhů k plochám, viz kapitola 7.4.



Obr. 4.4: Průběh proudové hustoty v ploše Tx vodiče

Ansyes byl do Solution modu přepnut příkazem /SOL, kde se provedlo nastavení analýzy a byl spuštěn výpočet, viz kapitola 7.6.

4.1.2 Postprocessing - získávání výsledků

Cílem této části bylo zjištění průběhů naindukovaných napětí U_i v závislosti na čase pro různé výškové pozice přijímacích cívek Rx. Pro indukované napětí platí vztah:

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} \cdot n \quad (V) \quad (4.3)$$

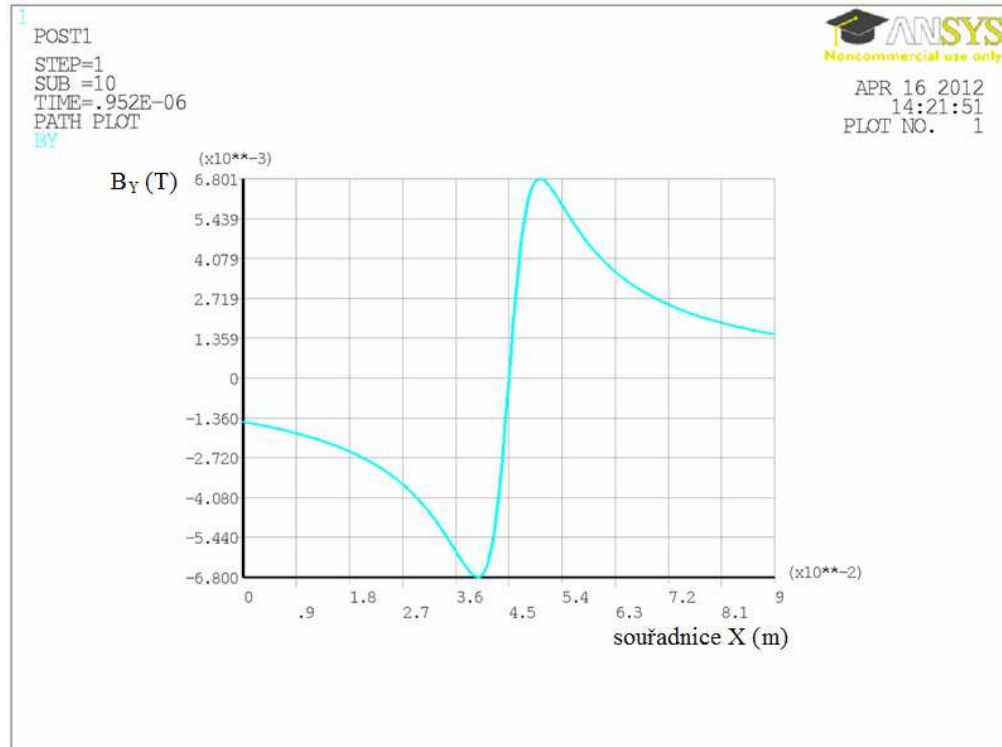
kde:

$$\Phi = l \cdot \int_{x_1}^{x_2} B_Y \cdot dx \quad (T) \quad (4.4)$$

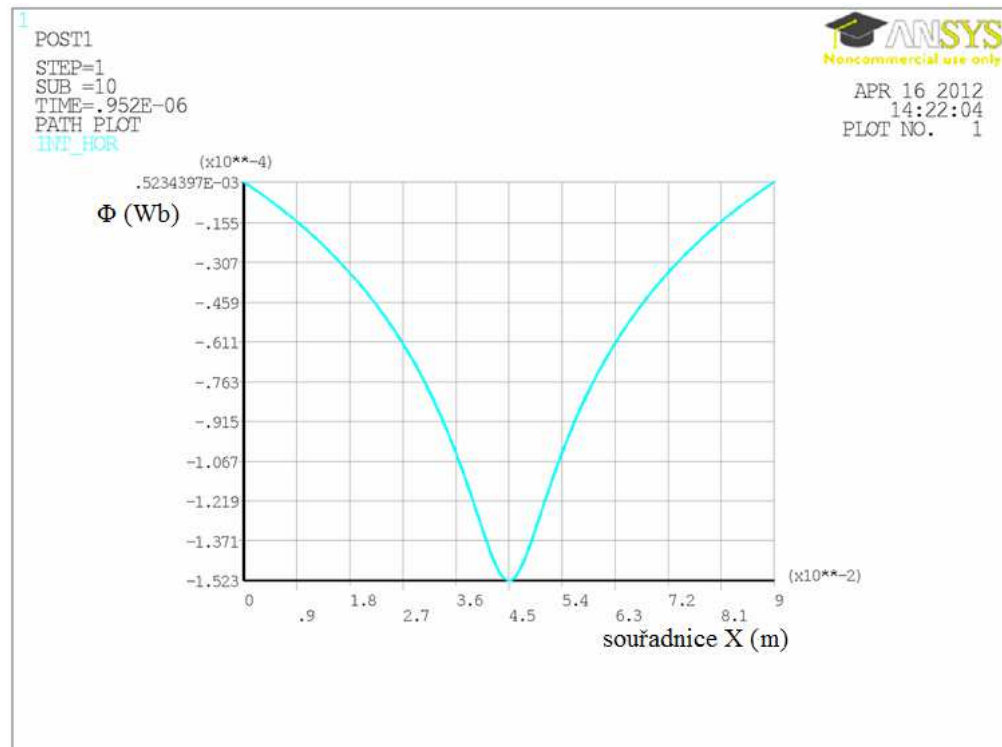
- $n...$ počet závitů Rx vinutí,
- $l...$ délka Rx vinutí ve směru osy Z,
- x_1 a $x_2...$ šířka Rx vinutí ve směru osy X,
- $B_Y...$ složka magnetické indukce v ose Y.

Zadáním souřadnic dvou bodů se nadefinovala úsečka (cesta), na kterou byly s určitým

krokem zaznamenaný hodnoty magnetické indukce B_Y . Průběh B_Y v závislosti na souřadnici X je na obr.: 4.5.



Obr. 4.5: Průběh magnetické indukce B_Y v závislosti na souřadnici X



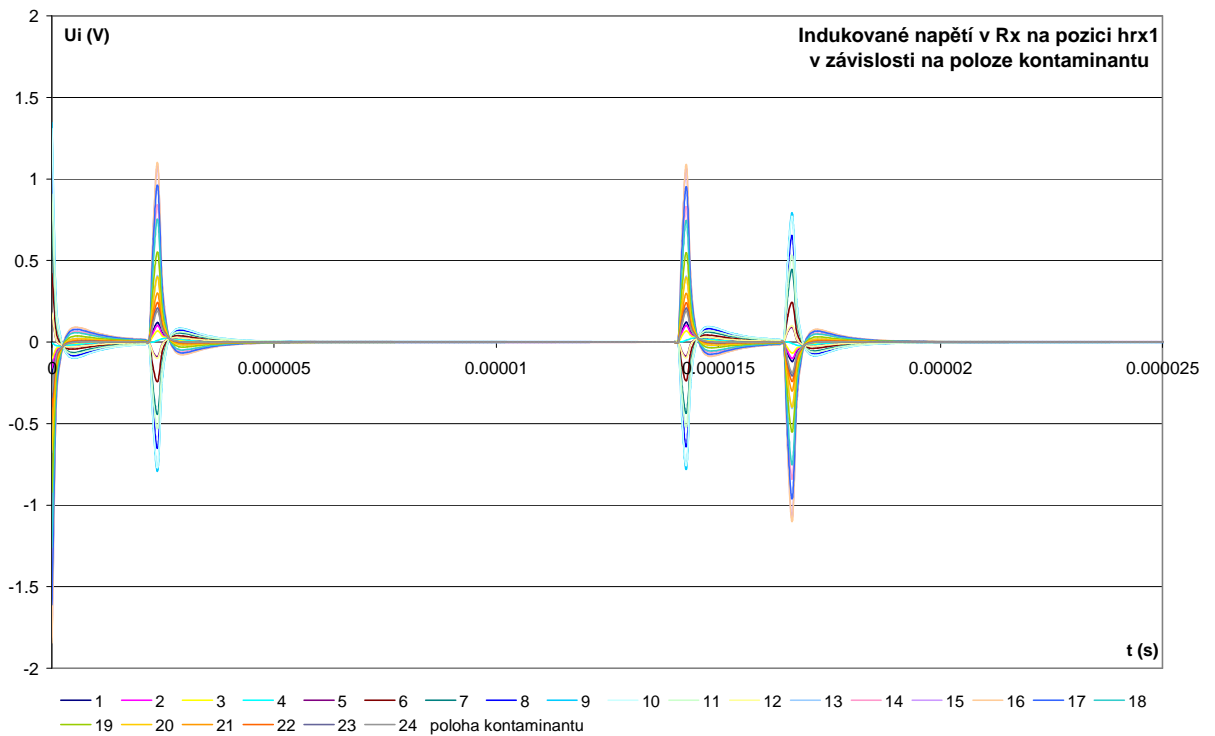
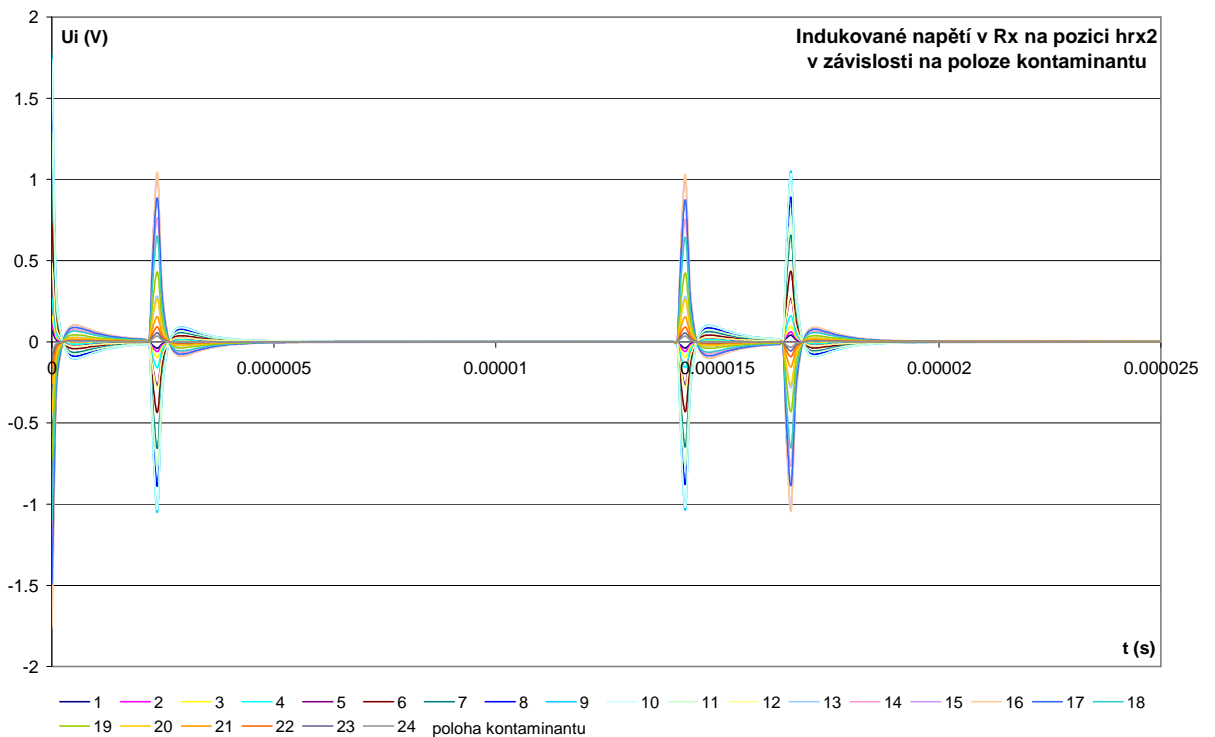
Obr. 4.6: Průběh magnetického toku Φ v závislosti na souřadnici X

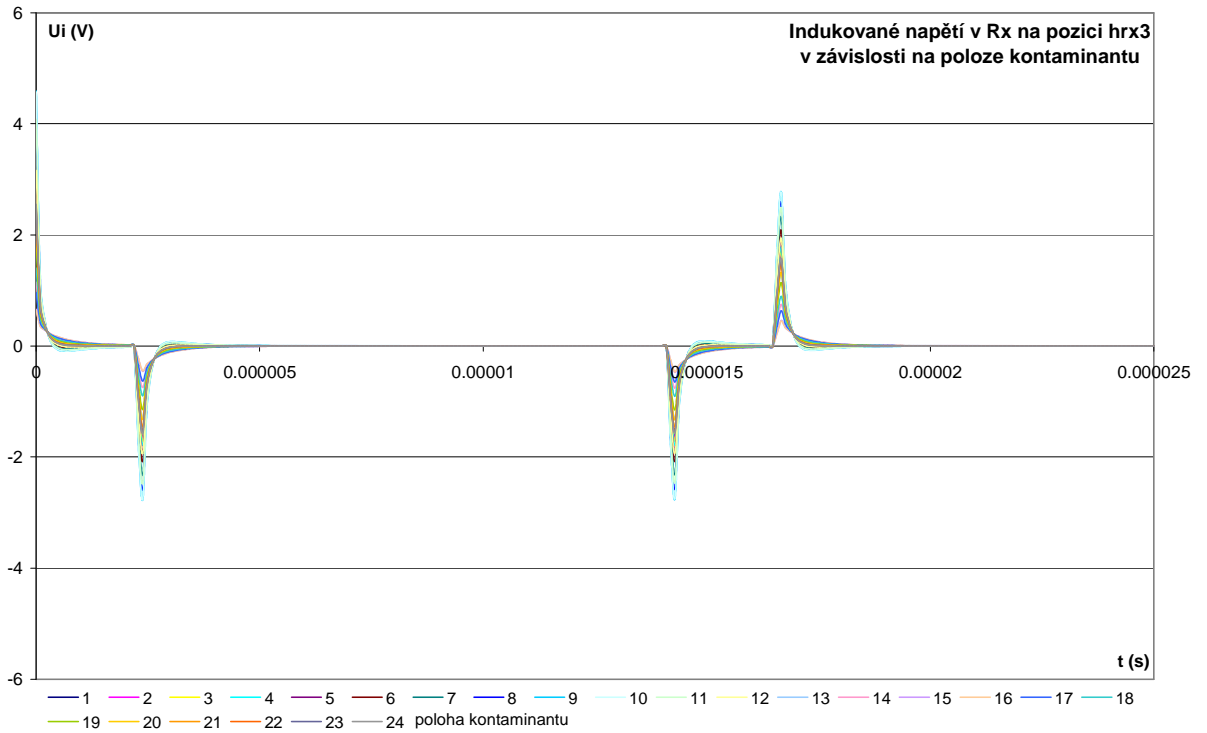
Integrováním průběhu B_Y se získal průběh magnetického indukčního toku Φ obr.: 4.6. Magnetický indukční tok Φ je roven určitému integrálu (rovnice 4.4) průběhu B_Y obr.: 4.5. Z toho vyplývá, že magnetický indukční tok je roven poslední hodnotě průběhu na obr.: 4.6. Tato hodnota se vynásobila délkou R_x vinutí. Postup výpočtu se opakoval pro všechny pozice R_x vinutí a to v každém kroku transientní analýzy. Tím se získala závislost magnetického indukčního toku Φ na čase t . V programu MS Excel se vynásobil tok počtem závitů R_x vinutí a byla provedena derivace podle času (rovnice 4.3). Takto byly zpracovány výsledky pro všechny pozice kontaminantu vůči T_x vinutí. APDL skript pro získávání hodnot viz kapitola 7.6 a v kapitole 7.7 je výpis makra, které ukládá hodnoty do souboru.

4.1.3 Hodnocení výsledků

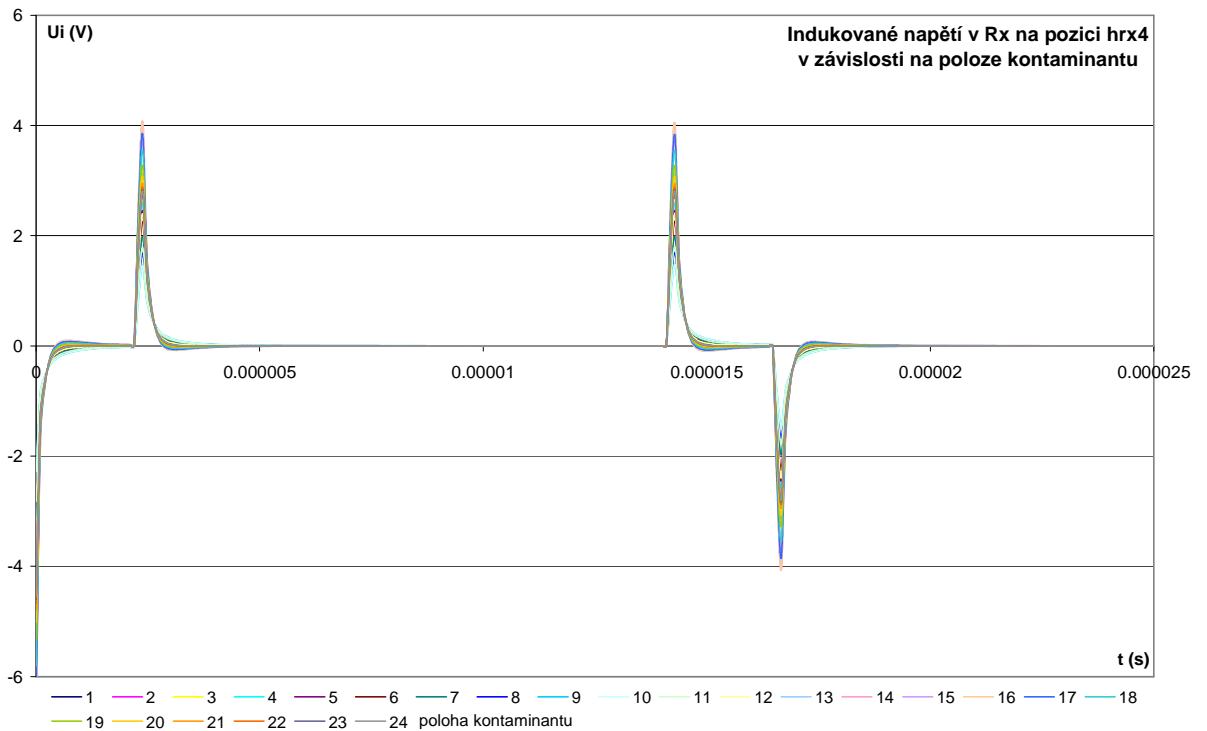
Vypočtené hodnoty U_i ve všech pěti výškových pozicích h_{rx} byly vyneseny do grafů v závislosti na čase. Pokud se vynesou do jednoho grafu průběhy indukovaných napětí pro každou pozici kontaminantu v dané výšce, lze sledovat odezvu indukovaného napětí na polohu kontaminantu. Jelikož byly provedeny tři série výpočtů s různými kontaminanty, lze porovnat i tvary přijímaných signálů pro jednotlivé materiály. Cílem této části je porovnat signály získávané v různých výškových polohách R_x vinutí a vybrat nejvhodnější signál pro detekci.

Na následujících grafech jsou znázorněny napěťové průběhy během jedné periody, v závislosti na poloze kontaminantu.

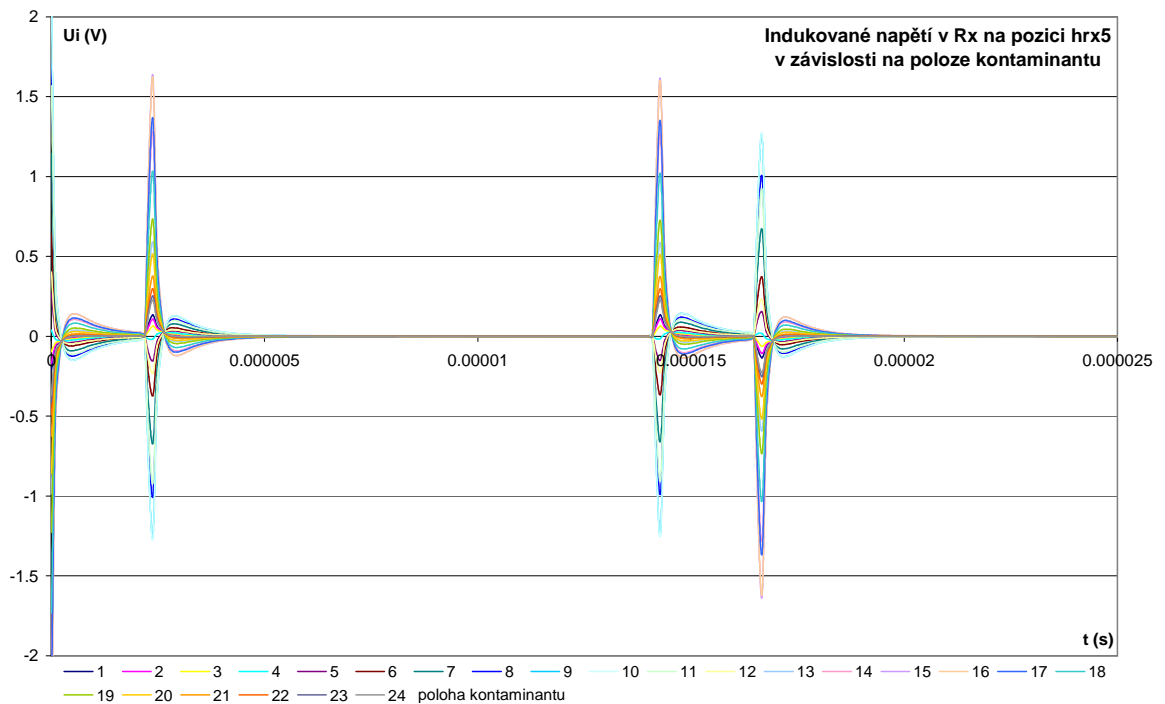
**Obr. 4.7: Průběhy U_i v závislosti na čase (železný kontaminant ve výšce 1)****Obr. 4.8: Průběhy U_i v závislosti na čase (železný kontaminant ve výšce 2)**



Obr. 4.9: Průběhy U_i v závislosti na čase (železný kontaminant ve výšce 3)

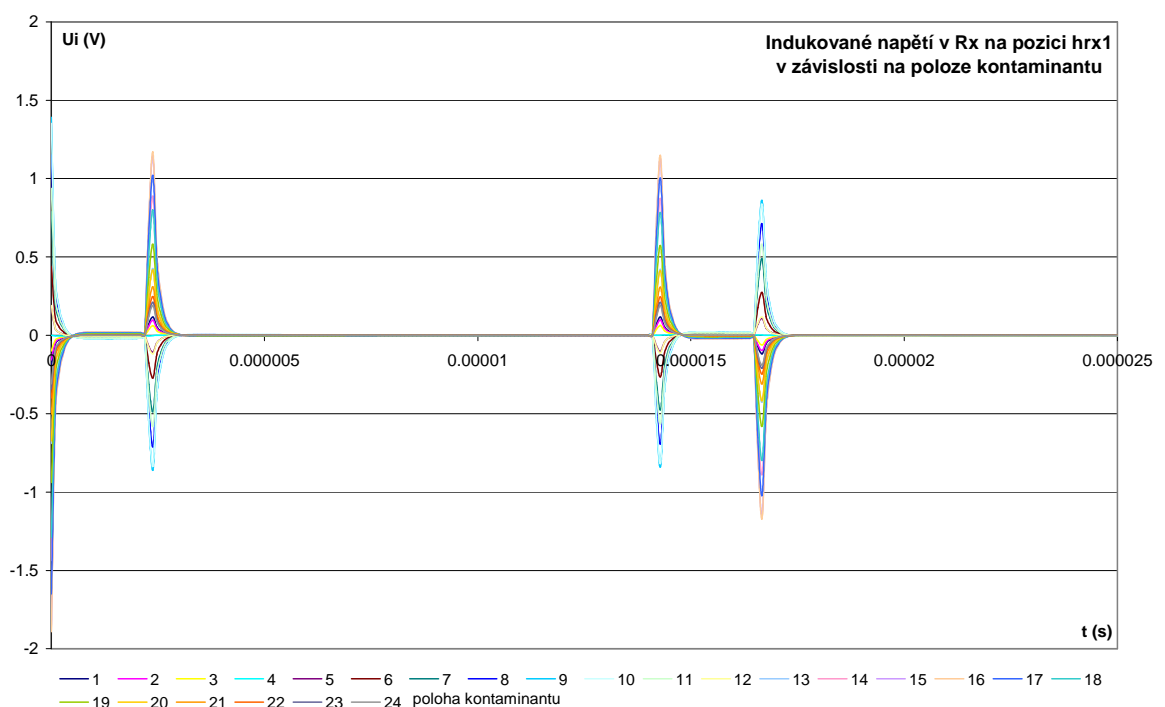


Obr. 4.10: Průběhy U_i v závislosti na čase (železný kontaminant ve výšce 4)

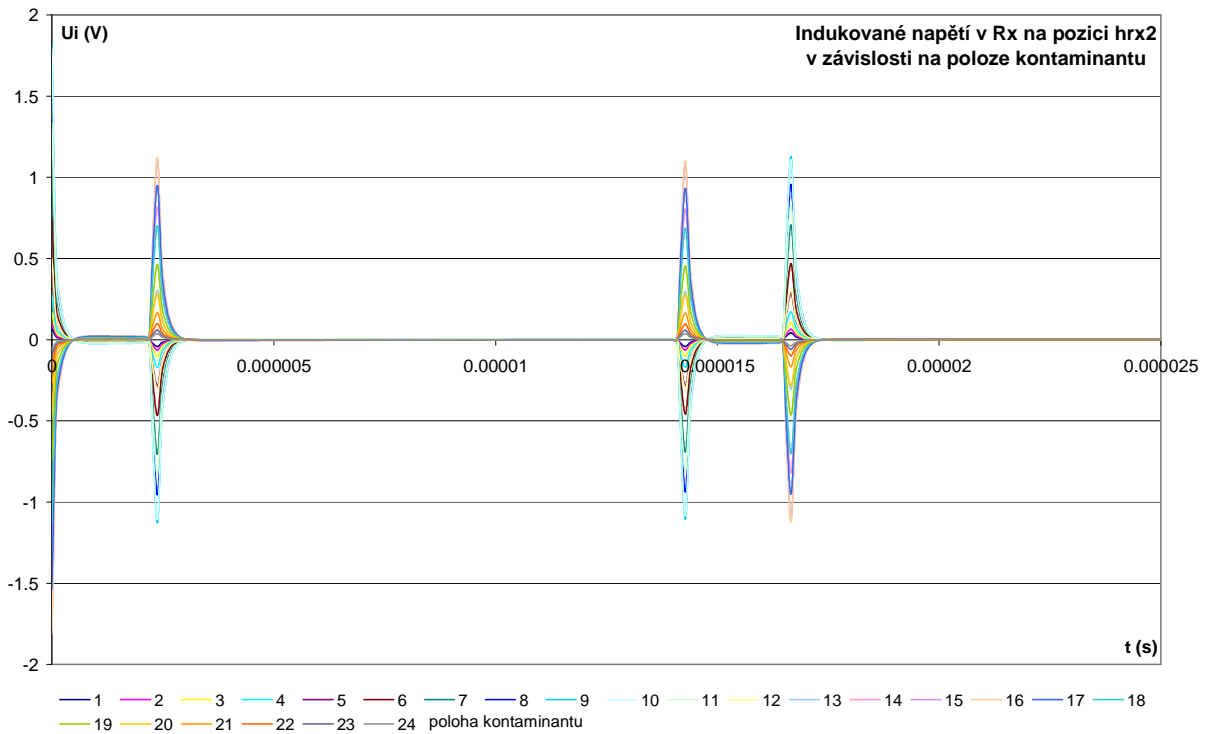


Obr. 4.11: Průběhy U_i v závislosti na čase (železný kontaminant ve výšce 5)

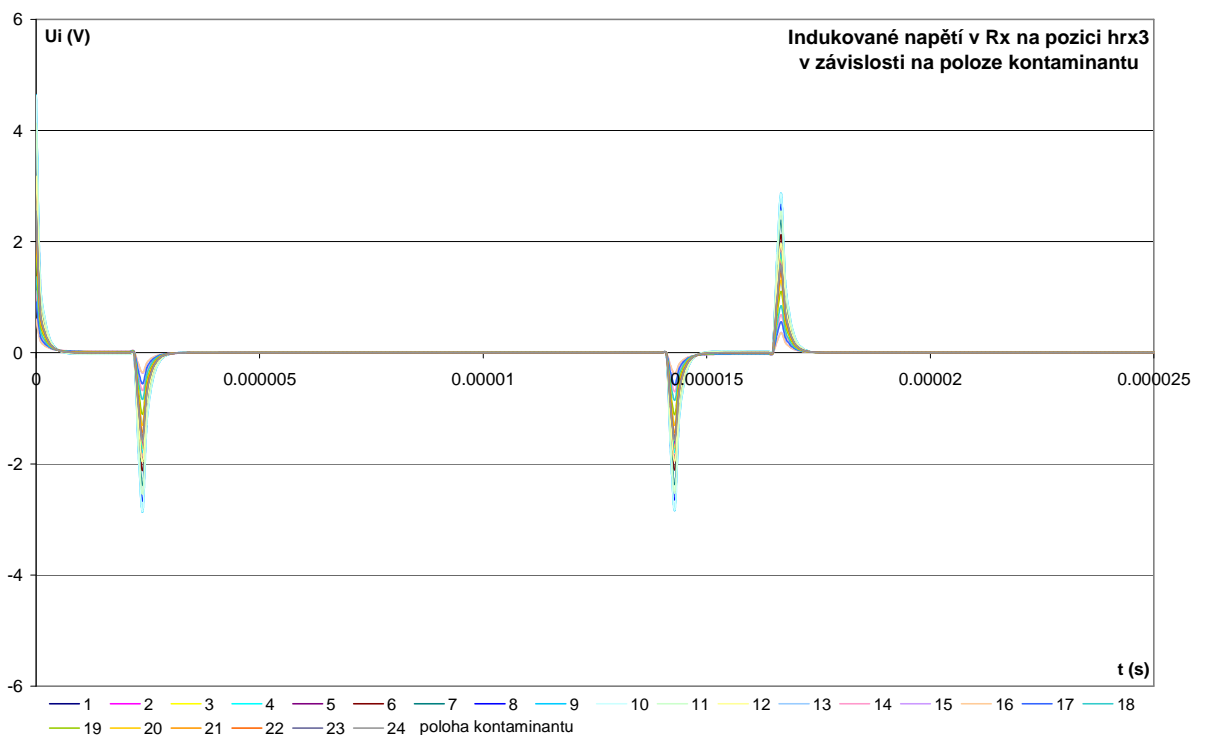
Na obrázcích 4.7 až 4.11 jsou zobrazeny průběhy odpovídající průchodu železného kontaminantu s relativní permeabilitou 400 a měrným elektrickým odporem $1,02 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$. Na průbězích 4.7, 4.8 a 4.11. lze pozorovat sice nižší hodnotu signálu, ale celková deformace během průchodu kontaminantu je větší.



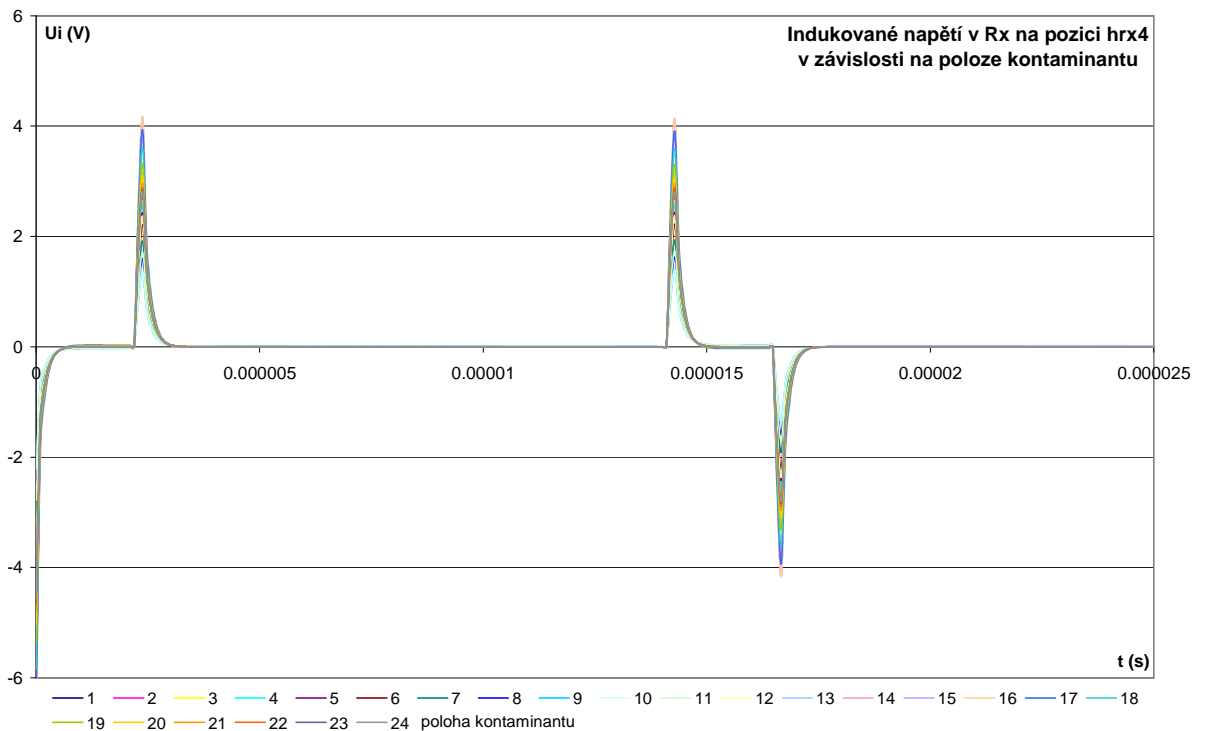
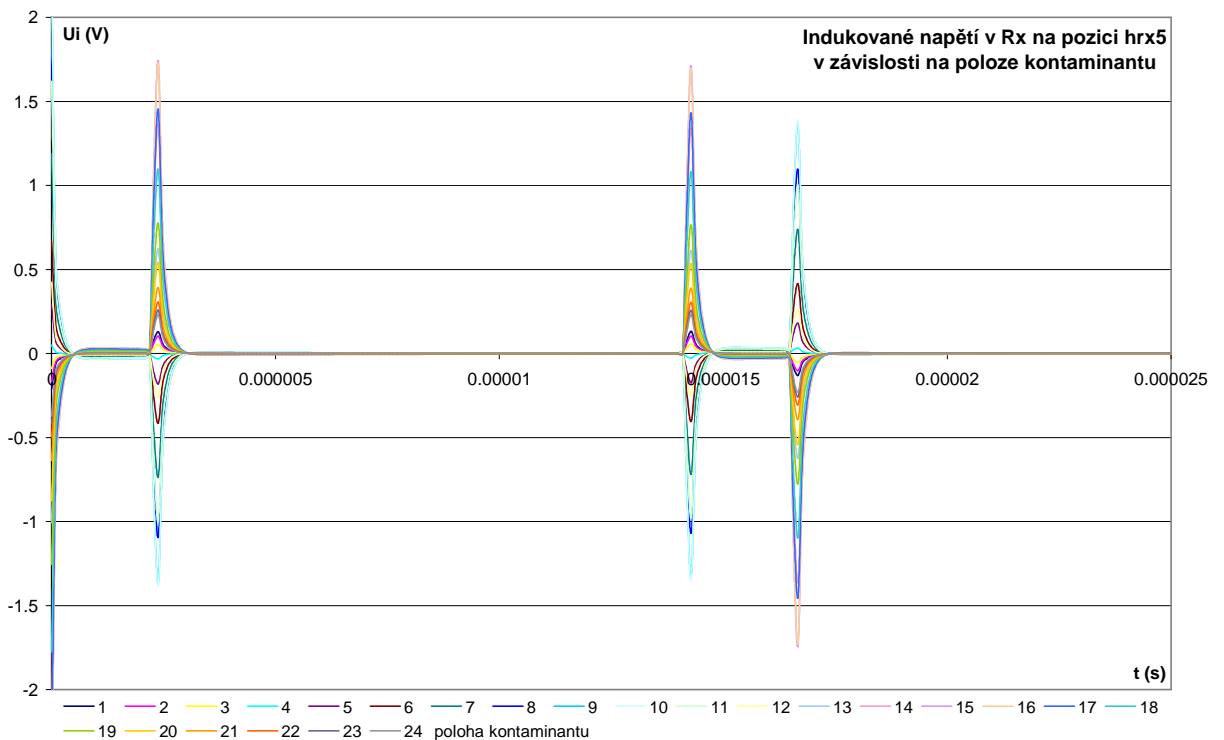
Obr. 4.12: Průběhy U_i v závislosti na čase (nerezový kontaminant ve výšce 1)



Obr. 4.13: Průběhy U_i v závislosti na čase (nerezový kontaminant ve výšce 2)

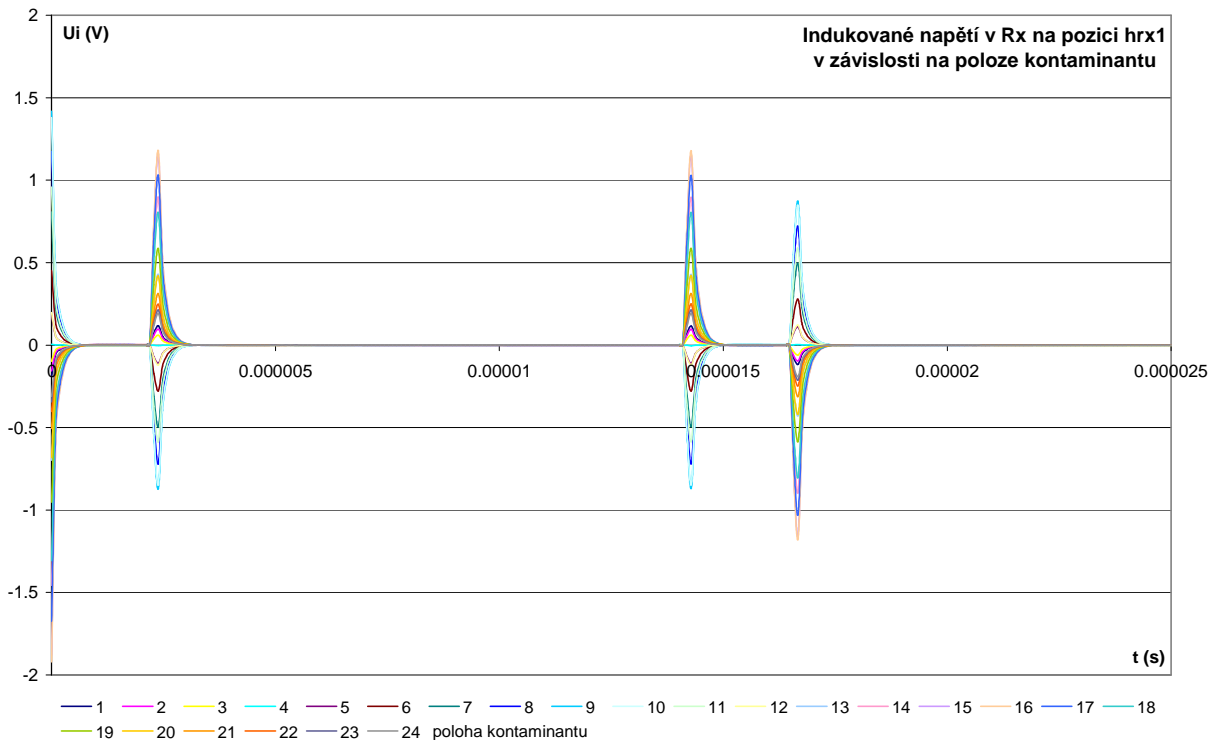


Obr. 4.14: Průběhy U_i v závislosti na čase (nerezový kontaminant ve výšce 3)

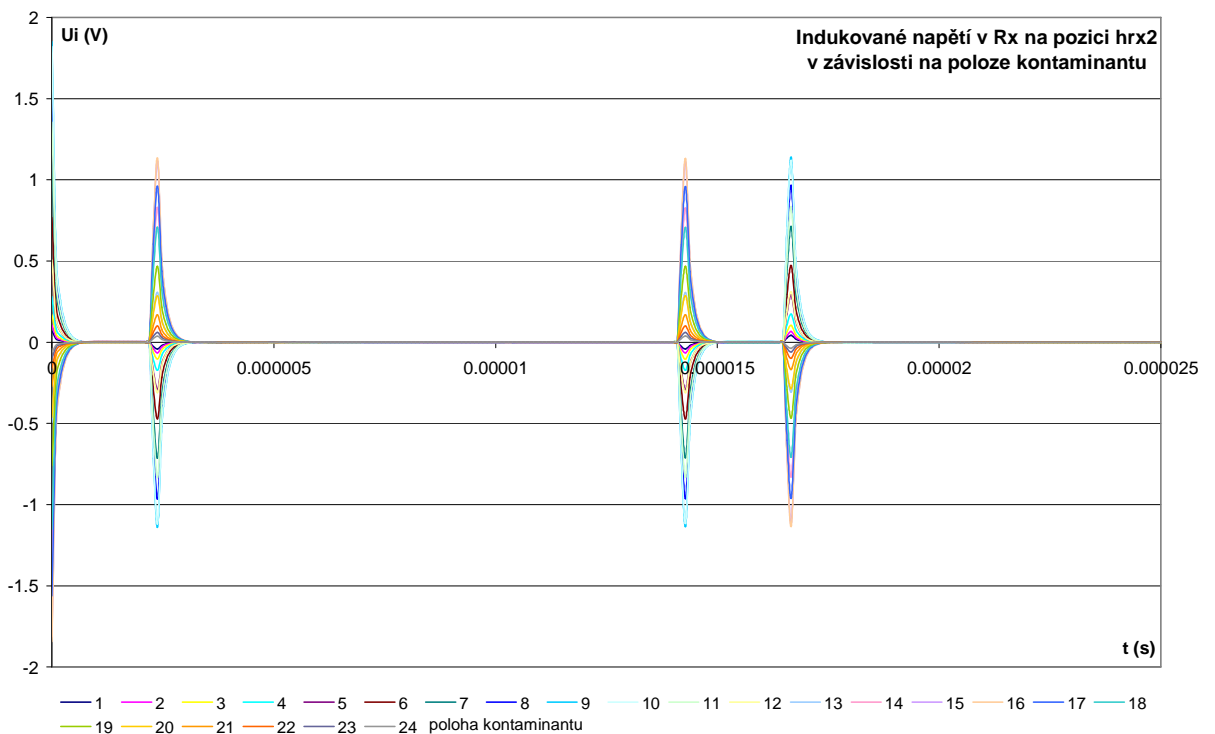
Obr. 4.15: Průběhy U_i v závislosti na čase (nerezový kontaminant ve výšce 4)Obr. 4.16: Průběhy U_i v závislosti na čase (nerezový kontaminant ve výšce 5)

Na obrázcích 4.12 až 4.16 jsou zobrazené průběhy odpovídající průchodu kontaminantu z nerezů ANSI 304 s relativní permeabilitou 1,008 a měrným elektrickým odporem $7,2 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$. Při porovnání s předchozím kontaminantem je změna signálu nižší, což odpovídá

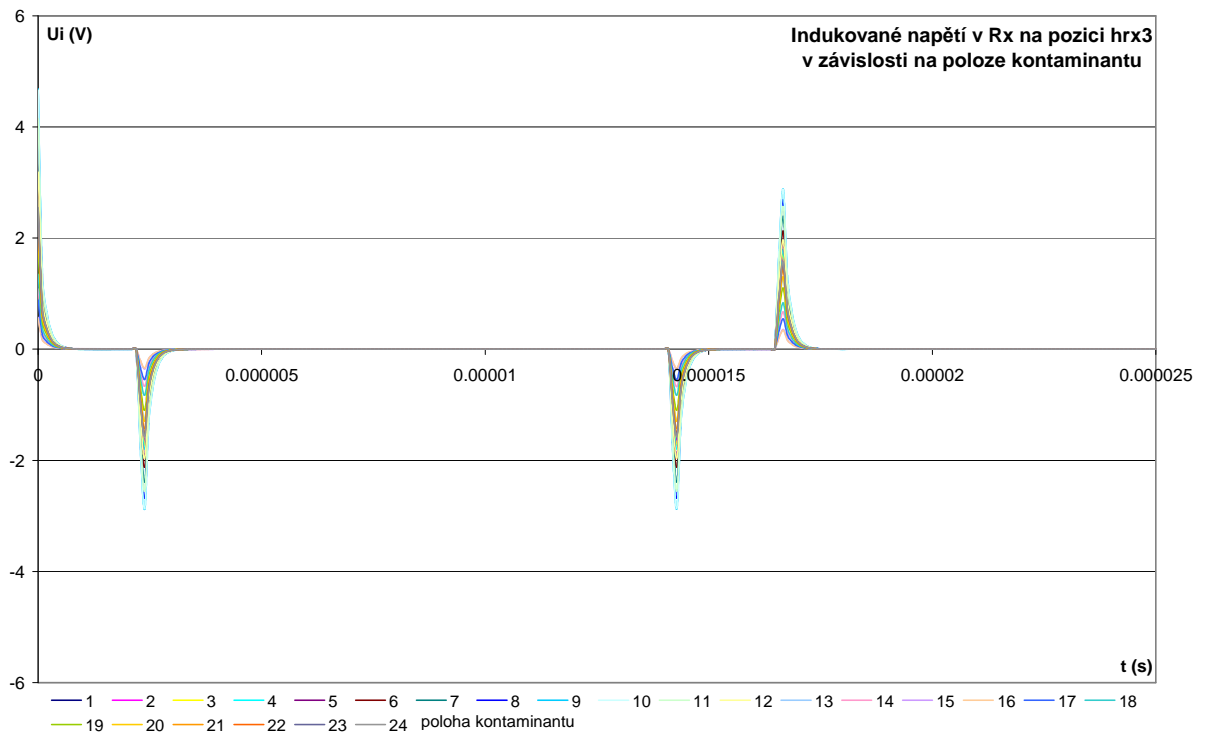
předpokladům o obtížnější detekci nerezových kontaminantů.



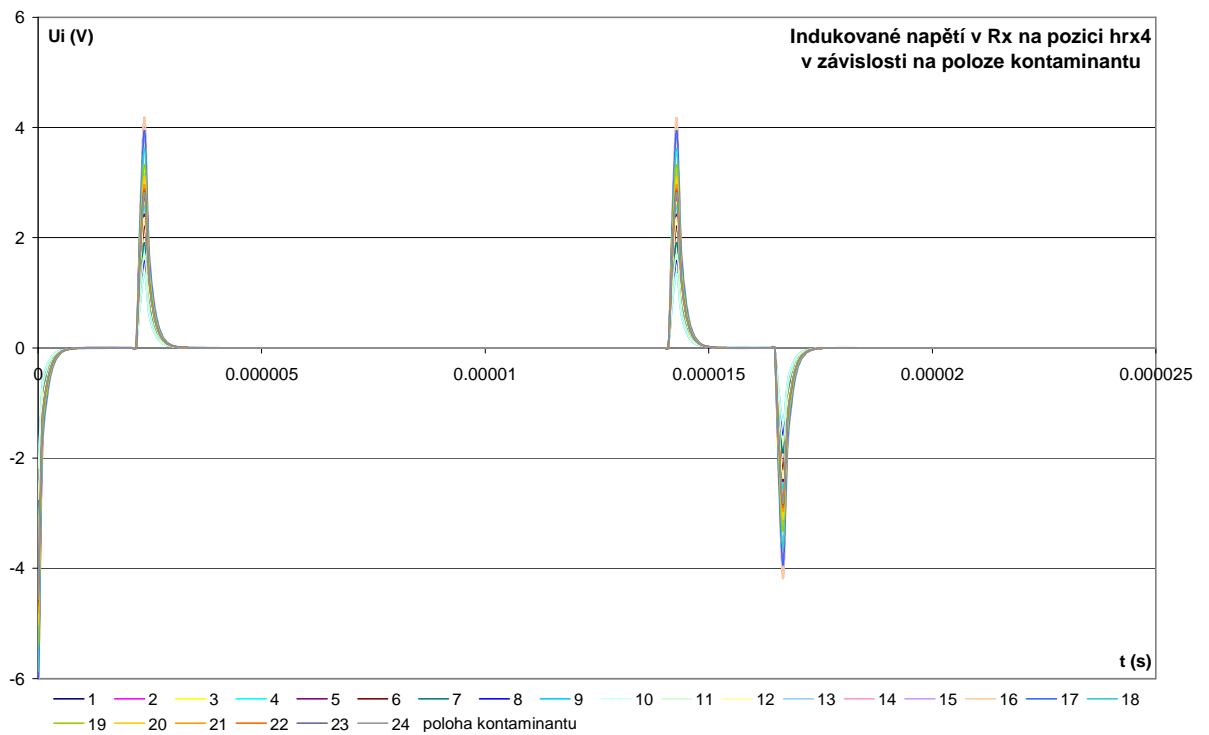
Obr. 4.17: Průběhy U_i v závislosti na čase (neželezný kontaminant ve výšce 1)



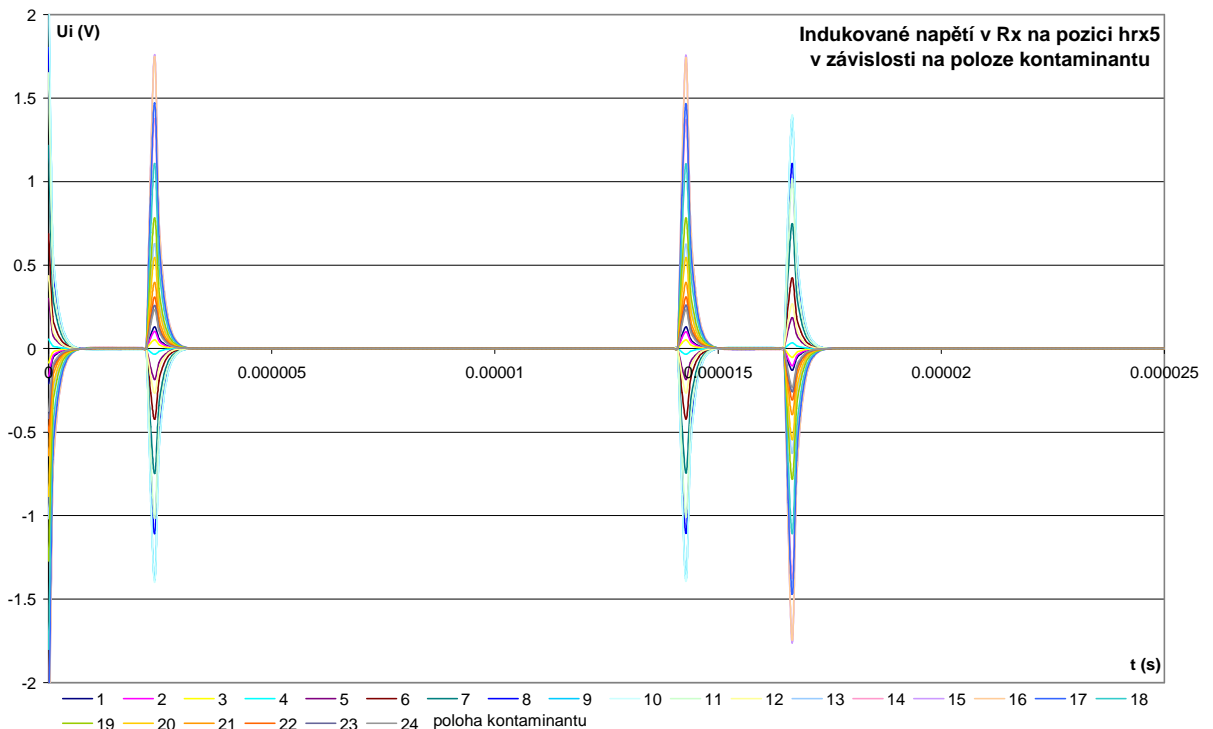
Obr. 4.18: Průběhy U_i v závislosti na čase (neželezný kontaminant ve výšce 2)



Obr. 4.19: Průběhy U_i v závislosti na čase (neželezný kontaminant ve výšce 3)



Obr. 4.20: Průběhy U_i v závislosti na čase (neželezný kontaminant ve výšce 4)

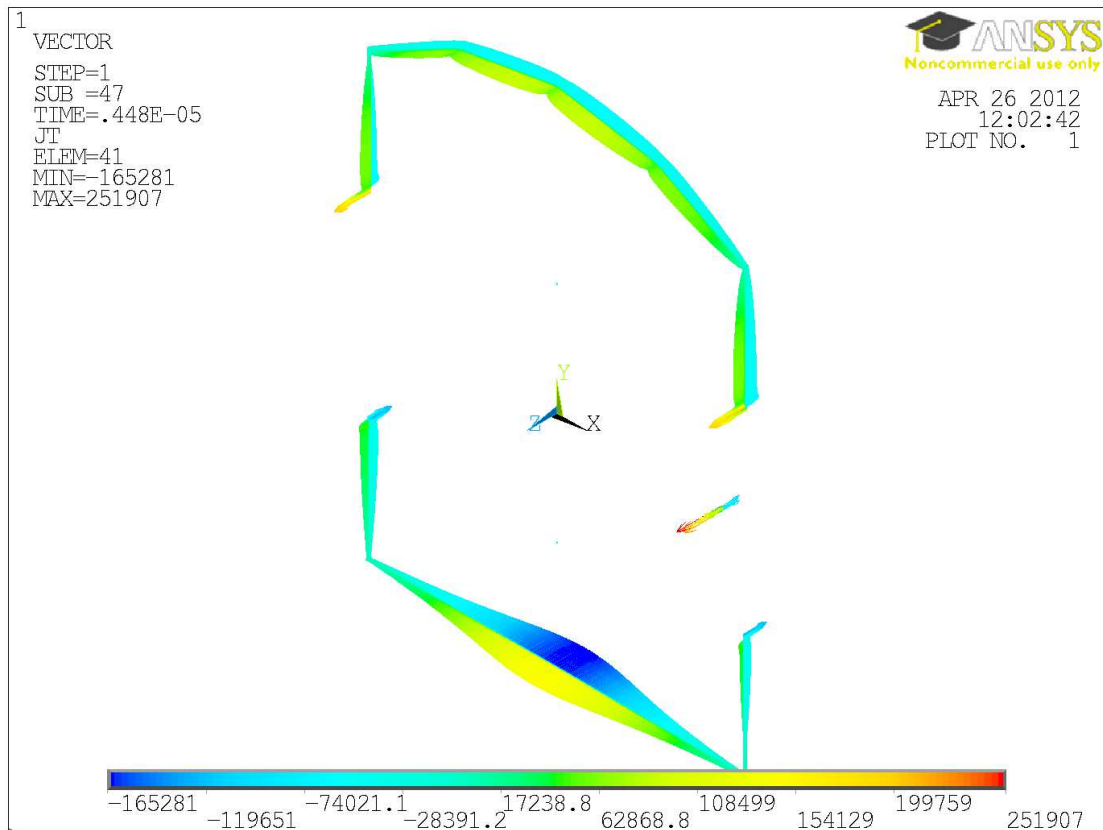


Obr. 4.21: Průběhy U_i v závislosti na čase (neželezný kontaminant ve výšce 5)

Na obrázcích 4.17 až 4.21 jsou zobrazeny průběhy odpovídající neželeznému kontaminantu (mědi) s parametry: relativní permeabilita 1 a měrný elektrický odpor $7,5 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$. Průběh signálu je velmi podobný signálům nerezového kontaminantu.

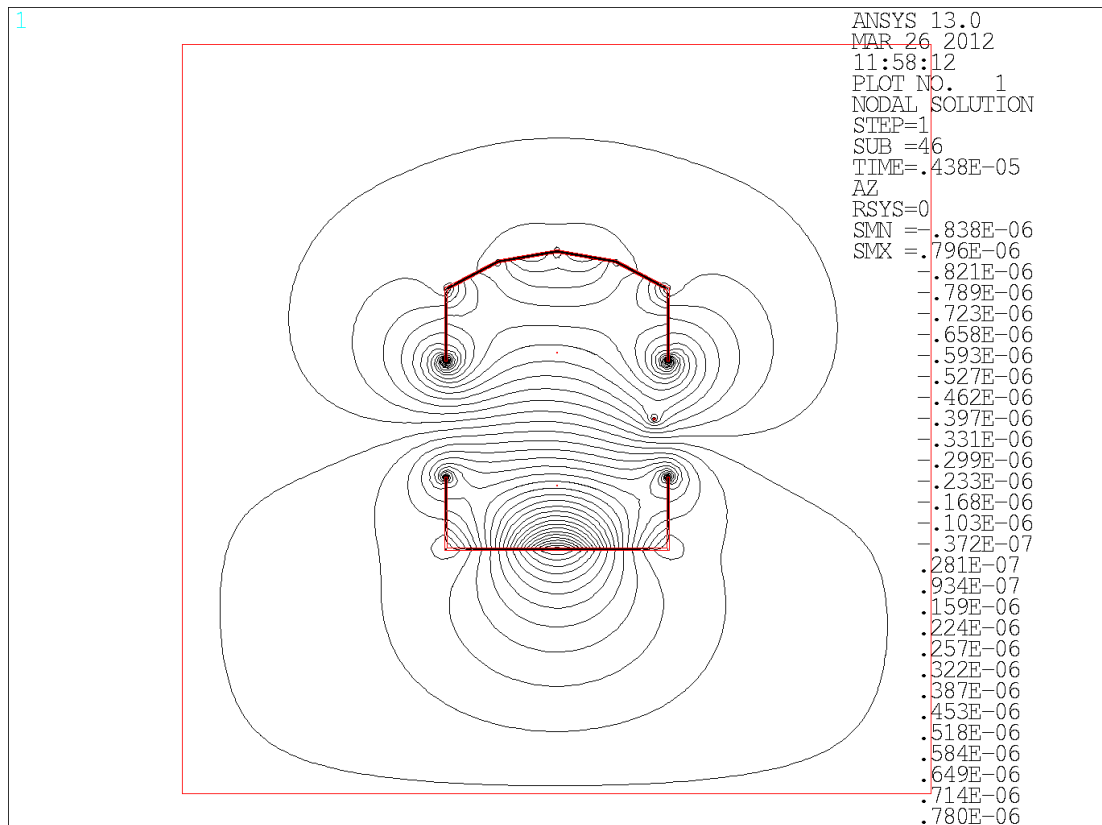
Porovnáním všech grafů (obr.: 4.7 - obr.: 4.22) je obecně vidět, že u průběhů ve výšce 3 a 4 je zisk signálu pro všechny modelované kontaminanty největší. Dochází zde ale ke změně amplitudy pouze v jednom smyslu, což z hlediska vyhodnocovacích algoritmů zlepšení detekce vylučuje. Naproti tomu je u signálu ve výšce 5 znatelně vyšší amplituda než v používané výšce 2. Na základě tohoto zjištění bude zhotoven prototyp detektoru za účelem ověření teoretických výsledků.

Na obrázku 4.22 je ukázka grafického výstupu zobrazujícího vektory proudové hustoty naindukované v nerezovém krytu a v kontaminantu.



Obr. 4.22: Vektory proudových hustot naindukovaných do kontaminantu a nerezového krytu

Obrázek 4.23 zobrazuje kontury magnetického pole ve stejném časovém kroku jako obr.: 4.22. Pole, které je konturami zobrazeno, je tvořeno právě proudovou hustotou obr.: 4.22. Je zde možné pozorovat, jak se pole deformuje přítomným kontaminantem.



Obr. 4.23: Kontury magnetického vektorového potenciálu s viditelnou deformací pole způsobenou feromagnetickým kontaminantem

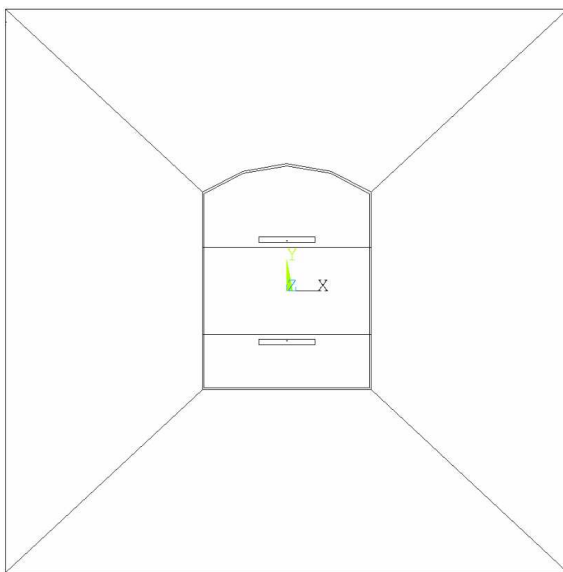
4.2 Vyšetřování množství vyzařované energie

V této části se vycházelo z předpokladu, že intenzita elektromagnetického pole uvnitř detektoru je mnohem větší než elektromagnetický šum, který do detektoru vniká z okolí. Proto lze předpokládat, že rušení bude způsobeno především deformací vlastního vyzařovaného pole v blízkém okolí detektoru. To vede ke snaze snižovat množství vlastního vyzářeného pole ven z detektoru, aby nemohlo být deformováno okolními předměty.

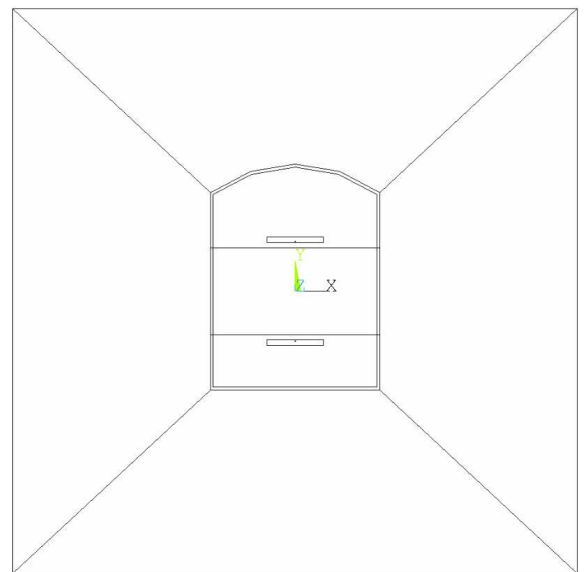
4.2.1 Řešení problému

Bylo porovnáno pět variant detektorů bez průchodu kontaminantu. Každá varianta se řešila jedním výpočtem, z čehož plyne malá časová náročnost, a proto byly problémy řešeny bez využití symetrie. První byl stávající detektor o tloušťce krycího nerezového plechu 3 mm, druhý byl stejné geometrie ale za použití silnějšího 5 mm tlustého nerez. Třetí typ měl tloušťku 3 mm, ale na horní a dolní stěně bylo přidáno další stínění z nerez ve tvaru T (obr.:

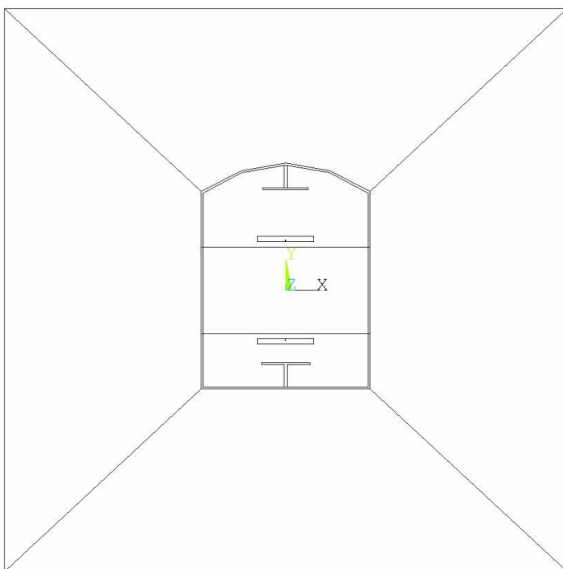
4.26). Poslední dva návrhy měly pravoúhlý tvar krytu celkově menších rozměrů, z nichž jeden byl jednoduchý o tloušťce 3 mm (obr.: 4.27) a druhý měl shora a zdola dvojité dno z nerezové tloušťky 3 mm (obr.: 4.28). Touto metodou by se dalo porovnávat mnohem větší množství provedení, které by se mohly lišit i použitým materiálem. Vzduchové okolí detektoru bylo rozděleno na čtyři sektory, v nichž se sečetly hodnoty magnetické energie jednotlivých elementů v každém kroku analýzy, a tím se získal průběh množství energie v daném prostoru na čas. Objemová hustota magnetické energie byla zjišťována ve všech plochách dané geometrie a bylo možno sledovat, jak se energie v čase přemísťuje.



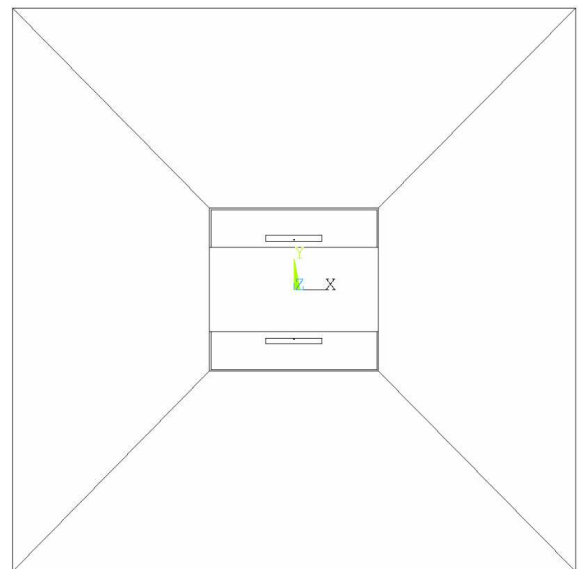
Obr. 4.24: Geometrie varianty: 3 mm



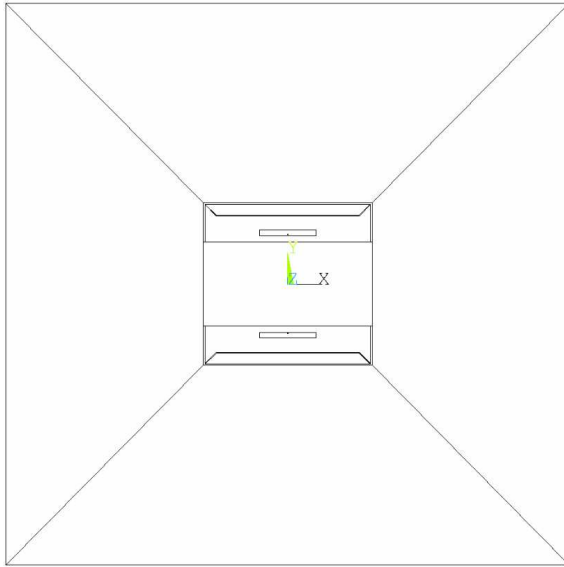
Obr. 4.25: Geometrie varianty: 5 mm



Obr. 4.26: Geometrie varianty: 3 mm-stineni



Obr. 4.27: Geometrie varianty: nový 1



Obr. 4.28: Geometrie varianty: nový 2

Příprava skriptů se od předchozích výpočtů lišila pouze v geometrii, jinak byla principiálně stejná. Rozdíl byl však v části post-processingu (získávání výsledků). Aby bylo možno přistupovat k jednotlivým sektorům, musel být každý sektor definován vlastním typem elementů (elementy byly použity stejné, jedná se pouze o číslování). Byly použity osmkrát elementy PLANE53:

```
ET,1,53 !Tx vinuti
ET,2,53 !prostor uvnitr detektoru
ET,3,53 !nerezovy obal
ET,4,53 !detekcni prostor
ET,5,53 !vzduchove okoli - horni
ET,6,53 !vzduchove okoli - pravy
ET,7,53 !vzduchove okoli - dolni
ET,8,53 !vzduchove okoli - levy
```

Příklad načítání výsledků pro jeden typ elementů:

```
/POST1 !prepnuti do postprocesoru
allsel !oznaceni vseh elementu
!vytvoreni pole pro ukadani hodnot
*DIM,energie1,TABLE,kroku,1,1,time,E,
!zapsani nulovych hodnot na zacatek vektoru vysledku
energie1(0,0)=0
energie1(0,1)=0
!cyklus ve kterem se nacitaji vysledky jednotlivych kroku simulace
*do,i,1,kroku,1
APPEND, 1, i, !nacteni daneho kroku
esel,,type,,1 !vybrani elementu typu 1
*GET, e_count1, ELEM, , count !vraci mnozstvi elementu daneho typu
*GET, e_next, ELEM, 0, NXTH !vraci nejnizsi adresu elementu daneho
!typu v promenne e_next
!vynulovani promenne
energ1=0
!cyklus který postupne prochazi vsechny elementy daneho typu
*do,j,1,e_count1,1
*GET, e_energ1, ELEM, e_next, SENE !ulozi do promenne e_energ1 mnozstvi
!energie v elementu s adresou e_next
```

```

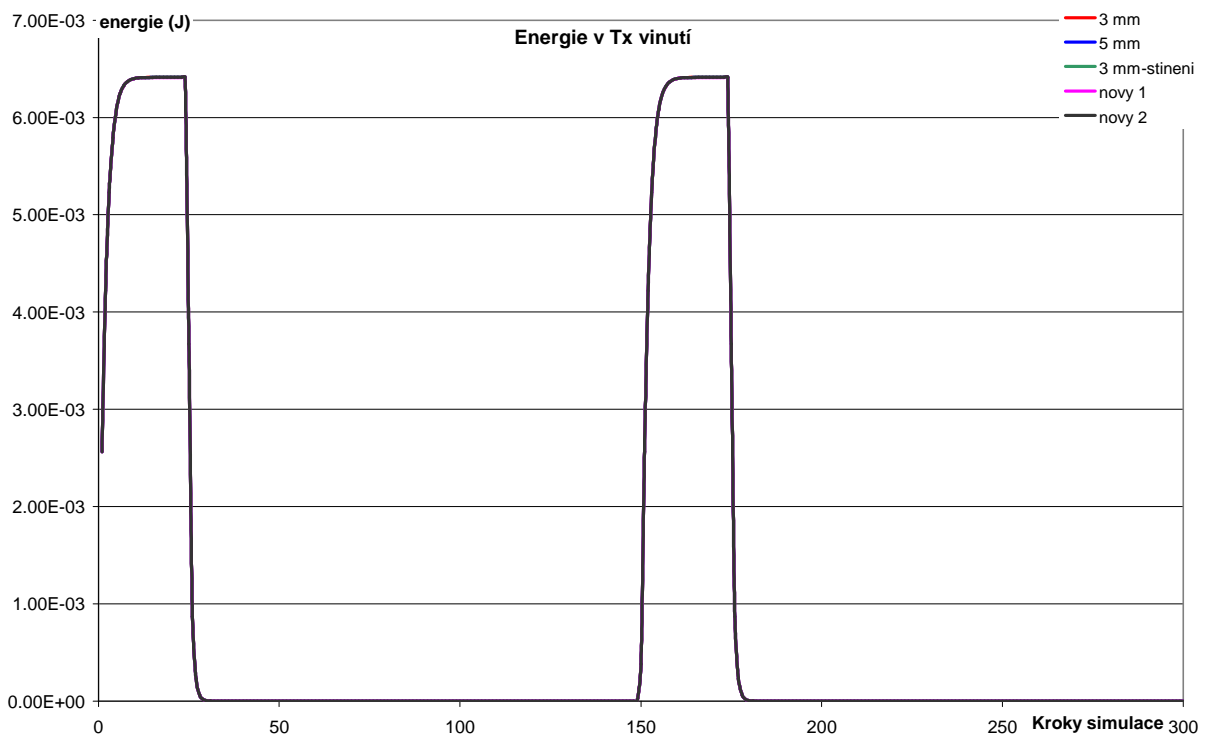
*GET, e_next, ELEM, e_next, NXTH      !posune adresu elementu o jedna
energ1=energ1+e_energ1                !pricte mnozstvi energie e_energ1 do
!kumulativni promenne energ1
*enddo                                 !konec vnitřního cyklu
energie1(i,0)=i                       !zapise do pole vysledku cislu jirju
energie1(i,1)=energ1                  !simulace
!zapise do pole vysledku mnozstvi
!energie v cele ploše s elementy daneho
!typu
*enddo                                 !konec vnejsiho cyklu

zapis_energ                            !zavolani makra pro zapis vysledku do
!souboru

```

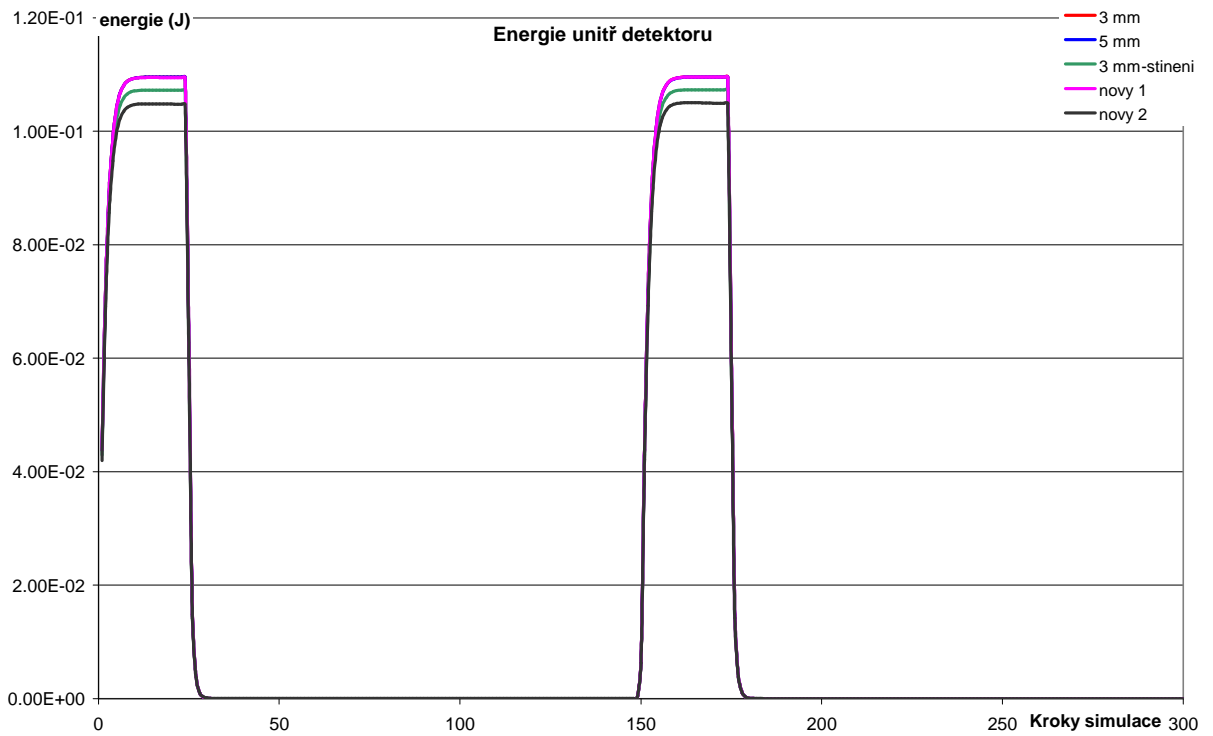
4.2.2 Hodnocení výsledků

V jednotlivých sektorech se provedla suma magnetické energie pro každý krok simulace. Výsledkem jsou průběhy množství energie v dané ploše v závislosti na krocích simulace (čase). Jednotlivé varianty byly hodnoceny na základě porovnání průběhů se stávajícím detektorem.



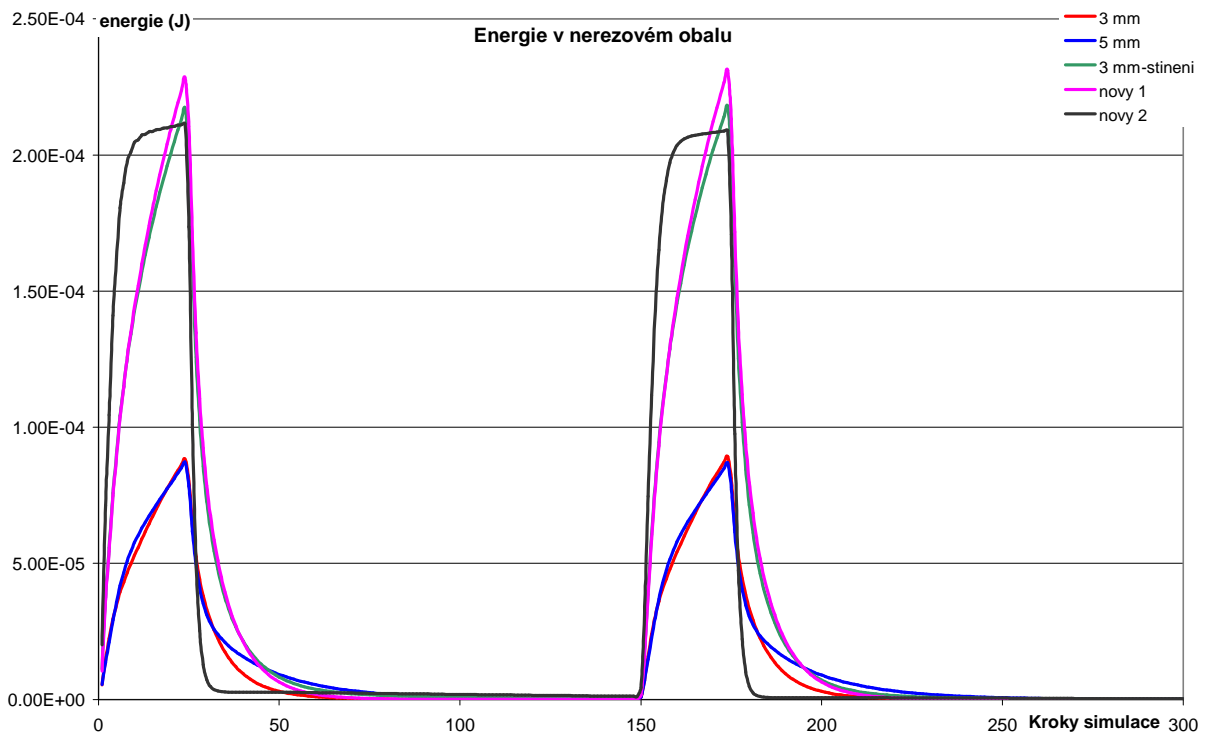
Obr. 4.29: Energie v Tx vinutí

Na grafu (obr.: 4.29) je vidět, že množství energie v Tx vinutí není závislé na geometrii a je dáno budícím signálem v Tx vinutí.



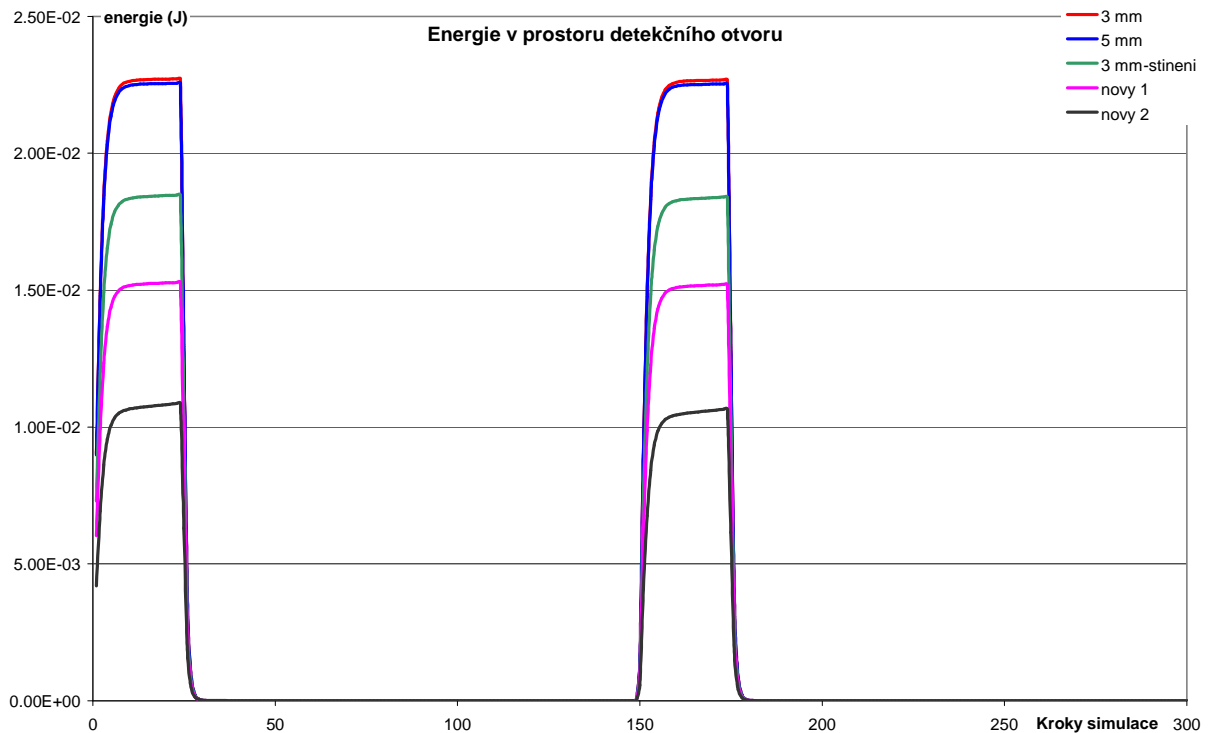
Obr. 4.30: Energie uvnitř detektoru

Na obr.: 4.30 je znázorněno množství energie v prostoru detektoru, do kterého není započítána detekční oblast, ta je zobrazena na obr.: 4.32. V této části není pozorována žádná výrazná změna.



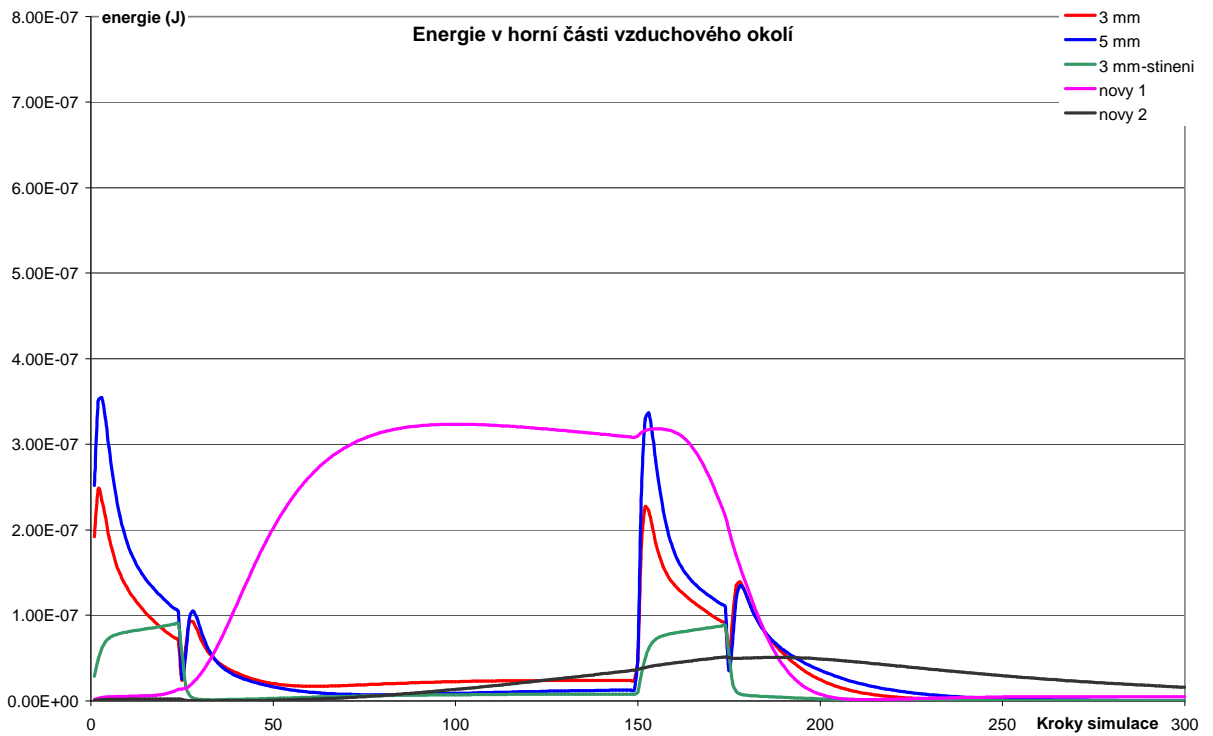
Obr. 4.31: Energie v nerezovém obalu

Výraznější změny se odehrávají v nerezovém obalu. Nejmenší množství energie je v klasické 3 mm tlusté a v 5 mm tlusté variantě. U klasické varianty se stíněním a u nových návrhů je nárůst způsoben přiblížením nerezů k Tx vinutí.

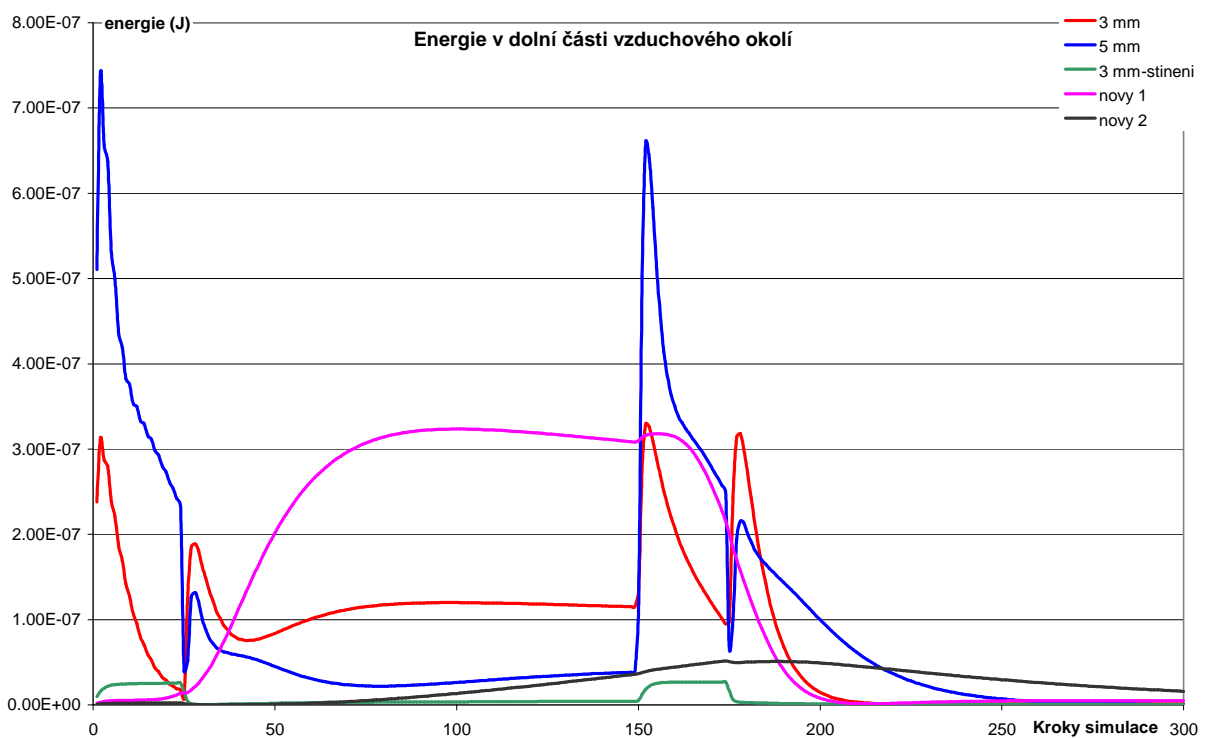


Obr. 4.32: Energie v prostoru detekčního otvoru

V oblasti detekčního otvoru je snaha o uchování co největšího množství energie, neboť zmenšení energie vede ke snížení odezvy na kontaminant, tedy ke snížení citlivosti detektoru. Z obr.: 4.32 je patrné, že geometrické úpravy detektoru (3 mm se stíněním, nový 1 a nový 2) vedou ke snížení množství energie v tomto prostoru.



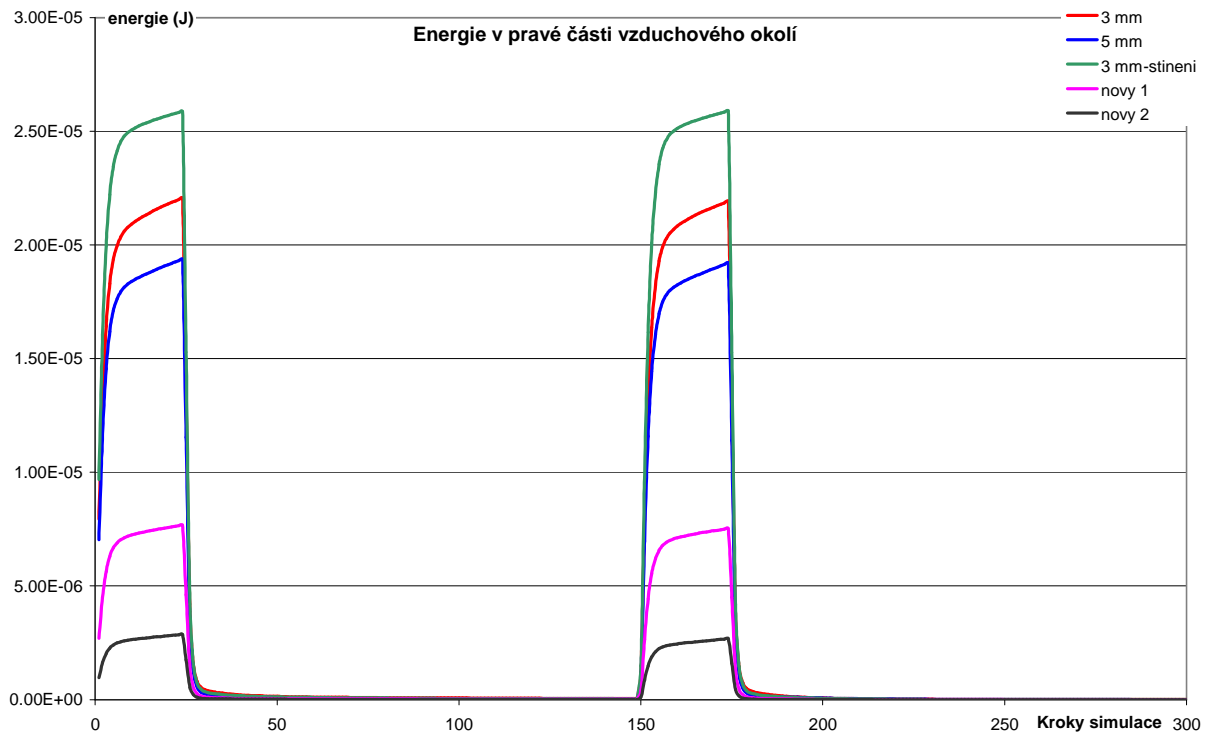
Obr. 4.33: Energie v horní části vzduchového okolí



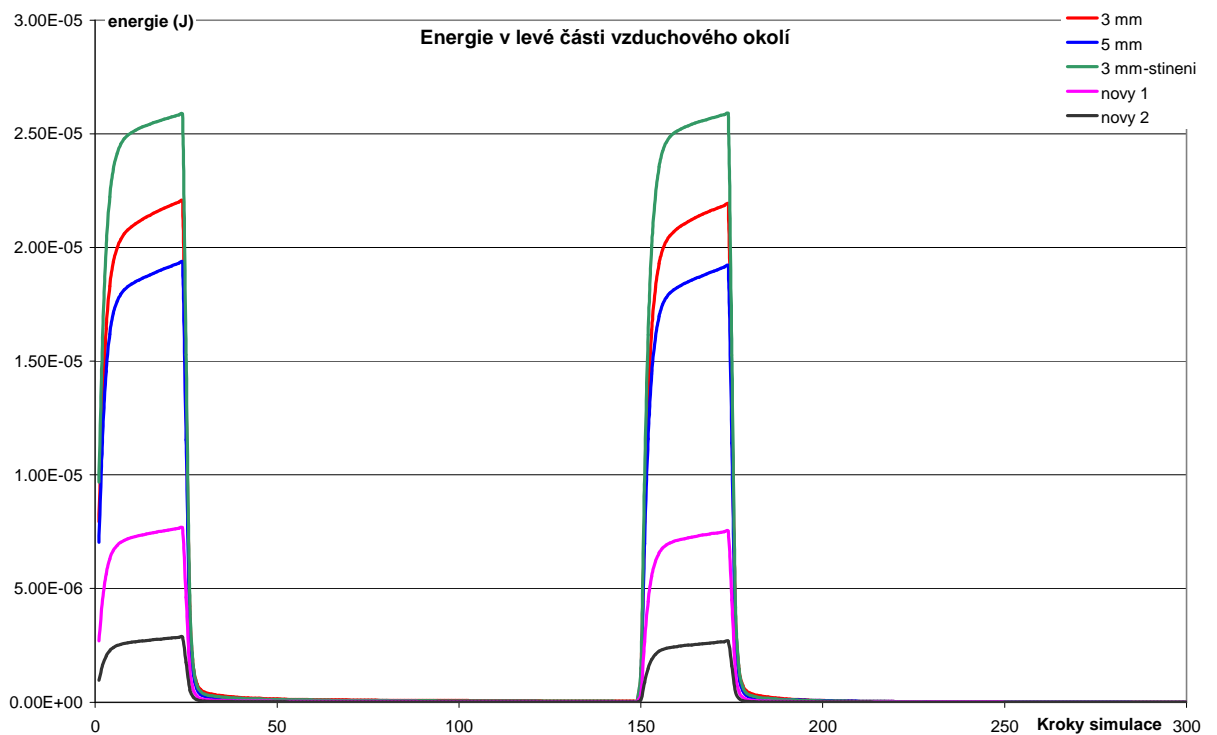
Obr. 4.34: Energie v dolní části vzduchového okolí

Porovnájí-li se obr.: 4.33 a 4.34 je u variant 1 - 3 možné pozorovat rozdíly mezi horní a dolní plochou. Je zde na první pohled vidět, jak horní oblouk snižuje množství energie unikající do

okolí. Jako účinné se z pohledu těchto sektorů jeví varianta klasického detektoru se stíněním a nový návrh s dvojitými stěnami.



Obr. 4.35: Energie v pravé části vzduchového okolí



Obr. 4.36: Energie v levé části vzduchového okolí

Pravý a levý sektor je z důvodů symetrie stejný, na obrázcích: 4.35 a 4.36 lze pozorovat tzv. metal free zónu, která se u detektorů udává. Jedná se o prostor před a za detekčním otvorem, ve kterém se nesmí nacházet žádný kovový materiál (z důvodu ovlivňování pole), snahou je tuto zónu co nejvíce zmenšit. Z grafů je patrné, že nový návrh s dvojitými stěnami vykazuje nejmenší množství energie v této oblasti. Naopak u klasické varianty se stíněním došlo k vytlačení pole z vnitřku detektoru právě do těchto okolních zón.

Na základě těchto poznatků bude provedeno ověření na skutečných zařízeních. Mezi použitelné varianty připadá klasická konstrukce doplněná o stínění a nový návrh s dvojitými stěnami. U toho je však velká hrozba snížení citlivosti způsobené menším množstvím energie v detekčním prostoru.

5 Závěr

Cílem předkládané práce je zlepšení činnosti detektorů kovů, případně úprava technologie výroby při současném snížení výrobních nákladů. Předpokladem úspěšných návrhů byla podrobná studie činnosti a principu těchto zařízení, která jsou výrobcem po několik let úspěšně prodávána na světových trzích.

Na základě těchto požadavků byly provedeny některé testy, které měly ověřit předpokládaná zlepšení. Nejširší možnosti přináší modelování magnetického pole průmyslových detektorů počítačovou simulací, která je zatím schopna řešit zadané problémy v dvourozměrném prostoru. Nejčastěji řešené problémy jsou stále spojeny se základním principem činnosti těchto zařízení, tj. vlivem a působením kontaminantu na elektromagnetické pole buzené cívkami uvnitř detektoru a nepříznivý vliv vnějších rušivých polí např. při současné činnosti sousedních detektorů. Dalším zdrojem rušivých magnetických polí může být i činnost a přítomnost různých elektrických zařízení, problém spojený s vhodným materiálem a tvarem stínění těchto zařízení.

Vzhledem k maximální citlivosti elektronických obvodů a požadované pečlivosti při balancování (vyvažování) se vyskytuje problém, který souvisí se stálostí nastavení detektoru při mechanickém otřesu, případně odstranění změn, ke kterým dochází vlivem dopravy.

Dalším plánovaným krokem je namodelování problému v trojrozměrném prostoru, od kterého je očekáváno zohlednění dalších vlivů a tím zpřesnění samotného výsledku.

6 Použitá literatura

- [1] Internetové stránky společnosti Loma Systems s.r.o. :
http://www.loma.com/_cz/index.shtml
- [2] Hájek J., Jarchovský Z.: *Detektory kovů - návod na stavbu*; nakladatelství BEN, Praha 2010
- [3] Beneda L.: *Detektory kovů*; bakalářská práce ZČU, Plzeň 2010
- [4] Internetové stránky společnosti Ad controls s.r.o.:
http://www.adcontrols.cz/detektory_kovu_zakladni_pojmy/
- [5] KOVOHUTĚ ROKYCANY, a.s.; COMTES FHT, a.s.; MATEX, s.r.o.: *Průběžná zpráva k projektu FeNi - č.j. 1021/207 - 32 za rok (2007 - 2009)*
- [6] Ansys Inc. ANSYS HELP, Release 13.0: *Dokumentace k programu*
- [7] Karban P. a kolektiv autorů: *Aplikace teoretické elektrotechniky*, Skripta ZČU, Plzeň 2011
- [8] Benešová, Z., Ulrych, B.: *Příručka pro použití programů ve výuce teorie elektromagnetického pole*. Skripta ZČU, Plzeň 1997
- [9] Loma Systems s.r.o.: *Knowledge Base - Interní dokumentace společnosti*
- [10] Internetové stránky společnosti Aerospace specification metals, Inc.:
<http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MQ304A>

7 Přílohy

7.1 Tvorba geometrie

```

/PREP7                                !prepnuti do rezimu preprocessingu
jj=8                                   !index polohy kontaminantu
r1=0.5e-3                              !polomer Tx vodice 0.5 mm
r2=1.5e-3                              !polomer kontaminantu 1.5 mm
c=90e-3                                !sirka Rx civek
h=176.7e-3                             !vzdalenost mezi Tx vinutim
hrx=(h/2)+5.26e-3                      !zakladni vyskova poloha mezi Rx civkami
hss=175e-3                             !vyska nerezoveho krytu
wss=150e-3                             !sirka nerezoveho krytu
tss=3e-3                               !tloustka nerezove steny
hd=h-22.7e-3                           !vyska detekcniho otvoru
wok=1000e-3                            !sirka vzduchoveho okoli
hok=1000e-3                            !vyska vzduchoveho okoli
wkon=(-250e-3)+(jj*20e-3)             !poloha kontaminantu na ose X

!tvorba geometrickych bodu nerezoveho krytu
K,1,0,225.89e-3,0
K,2,0,221.85e-3,0
K,3,-79.07e-3,212.08e-3,0
K,4,-78e-3,208.5e-3,0
K,5,79.07e-3,212.08e-3,0
K,6,78e-3,208.5e-3,0
K,7,-wss,hss,0
K,8,-wss+tss,hss-tss,0
K,9,wss,hss,0
K,10,wss-tss,hss-tss,0
K,11,-wss,-hss,0
K,12,-wss+tss,-hss+tss,0
K,13,wss,-hss,0
K,14,wss-tss,-hss+tss,0

!vytvoreni ploch definovanymi body
FLST,2,7,3
FITEM,2,7
FITEM,2,3
FITEM,2,1
FITEM,2,5
FITEM,2,9
FITEM,2,13
FITEM,2,11
A,P51X

FLST,2,7,3
FITEM,2,8
FITEM,2,4
FITEM,2,2
FITEM,2,6
FITEM,2,10
FITEM,2,14
FITEM,2,12
A,P51X

CYL4,0,h/2,r1                          !plocha horniho Tx vodice
CYL4,0,-h/2,r1                         !plocha dolniho Tx vodice
BLC5,0,((h/2)+hrx)/2,100e-3,10e-3     !plocha horniho vzduchoveho okoli Tx
vodice
BLC5,0,-((h/2)+hrx)/2,100e-3,10e-3    !plocha dolniho vzduchoveho okoli Tx
vodice
BLC5,0,0,2*wss,hd                      !plocha detekcniho otvoru
APTn,a11                                !rozdeleni prekryvajicich se ploch

!odstraneni ploch ktere budou sjednoceny se vzduchovym okolim

```

```

FLST,2,5,5,ORDE,4
FITEM,2,10
FITEM,2,-12
FITEM,2,15
FITEM,2,18
ADELE,P51X

```

```

BLC5,0,0,wok,hok          !vytvoreni plochy vzduchoveho okoli
APTN,a11                  !rozdeleni prekryvajicich se ploch

```

```

CYL4,wkon,0,r2           !vytvoreni plochy kontaminantu
APTN,a11                  !rozdeleni prekryvajicich se ploch
!konec tvorby geometrickeho modelu

```

7.2 Definice elementů, materiálů a jejich přiřazení k plochám

```
!definovani materialu
```

```

MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,1,,1        !material 1 Tx, permeabilita 1
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,2,,1        !material 2 Air, permeabilita 1
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,3,,1.008    !material 3 nerezovy kryt S/S ANSI 304 permeabilita
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,RSVX,3,,7.2e-7   !material 3 nerezovy kryt S/S Ansi 304 rezistivita
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,MURX,4,,400      !material 4 Kontaminant, permeabilita
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,RSVX,4,,1.02e-7  !material 4 Kontaminant, rezistivita

```

```
!definovani elementu
```

```

!*
ET,1,53                  !Tx civky
!*
ET,2,53                  !Vzduch
!*
ET,3,53                  !nerezovy kryt
!*
ET,4,53                  !kontaminant
!*

```

```
!nastaveni elementu
```

```

!*
KEYOPT,1,1,0             !Tx civky
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,7,0
!*
KEYOPT,2,1,0             !Air
KEYOPT,2,2,0
KEYOPT,2,3,0
KEYOPT,2,4,0
KEYOPT,2,5,0
KEYOPT,2,7,0
!*
KEYOPT,3,1,0             !S/S
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,3,3,0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,0

```

```

KEYOPT,3,7,0
!*
KEYOPT,4,1,0           !kontaminant
KEYOPT,4,2,0
KEYOPT,4,3,0
KEYOPT,4,4,0
KEYOPT,4,5,0
KEYOPT,4,7,0
!*

!prirazení elementu a materialum k plochám
FLST,5,2,5,ORDE,2           !Tx
FITEM,5,8
FITEM,5,-9
CM,_Y,AREA
ASEL,, , , P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 1, , 1, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,3,5,ORDE,3           !Air
FITEM,5,3
FITEM,5,16
FITEM,5,-17
CM,_Y,AREA
ASEL,, , , P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 2, , 2, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
FLST,5,2,5,ORDE,2           !S/S
FITEM,5,13
FITEM,5,-14
CM,_Y,AREA
ASEL,, , , P51X
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 3, , 3, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*
CM,_Y,AREA
ASEL,, , , 1           !kontaminant
CM,_Y1,AREA
CMSEL,S,_Y
!*
CMSEL,S,_Y1
AATT, 4, , 4, 0,
CMSEL,S,_Y
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
!*

```


7.3 Síťování oblastí

```

FLST,2,7,5,ORDE,7
FITEM,2,1
FITEM,2,8
FITEM,2,-9
FITEM,2,13
FITEM,2,-14
FITEM,2,16
FITEM,2,-17
AESIZE,P51X,0.0005,      !nastaveni delky steny elementu 0.0005 m
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,3
AESIZE,P51X,0.01,      !nastaveni delky steny elementu 0.01 m
MSHAPE,1,2D             !nastaveni 2D trojuhelnikove site
MSHKEY,0
!*
FLST,5,8,5,ORDE,8
FITEM,5,1
FITEM,5,3
FITEM,5,8
FITEM,5,-9
FITEM,5,13
FITEM,5,-14
FITEM,5,16
FITEM,5,-17
CM,_Y,AREA
ASEL,,,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1               !spusteni automatickeho sitovani
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*

```

7.4 Okrajová podmínka a nastavení budicího průběhu

```

!okrajova podminka
FLST,2,4,4,ORDE,4
FITEM,2,14
FITEM,2,12
FITEM,2,7
FITEM,2,5
DL,P51X, ,AZ,0,

!nastaveni zatizeni
!parametry budici proudove hustoty
f=35e3      !frekvence signalu [Hz]
part=600    !pocet kroku signalu
T_min=0     !pocatek casove osy
T_max=1/f   !konec casove osy
dt=T_max/part  !casovy krok

!parametry prudove hustoty
pi=4*atan(1)
s=pi*r1**2
I=600*sqrt(2)
N1=1
J1_a=I*N1/s

!definovani vzestupne casti pulsu
tau=3
*DIM,Jex,TABLE,50,1,1,time,J,
Jex(1,1)=0

```

```

Jex(1,0)=0
*do,i,2,50,1
Jex(i,1)=(J1_a)*(1-exp(-i/tau))
Jex(i,0)=(i)
*enddo

!definovani sestupne casti pulsu
tau=3
*DIM,Jex1,TABLE,50,1,1,time,J,
Jex1(1,1)=J1_a
Jex1(1,0)=0
*do,i,2,50,1
Jex1(i,1)=(J1_a)*(exp(-i/tau))
Jex1(i,0)=(i)
*enddo

!sestaveni celeho pulsu
*DIM,Jex2,TABLE,100,1,1,time,J,
Jex2(1,1)=0
Jex2(1,0)=0
*do,i,2,50,1
Jex2(i,1)=Jex(i,1)
Jex2(i,0)=(i)
*enddo
*do,i,51,100,1
Jex2(i,1)=Jex1(i-50,1)
Jex2(i,0)=(i)
*enddo

!priprava nulovych vektoru kladneho a zaporneho prubehu J
*DIM,J1,TABLE,600,1,1,time,J,
*DIM,mJ1,TABLE,600,1,1,time,J,
*do,i,1,600,1
J1(i,0)=(i-1)*dt !time
J1(i,1)=0 !J
mJ1(i,0)=(i-1)*dt !time
mJ1(i,1)=0 !-J
*enddo

!vlozeni prvniho pulsu
*do,i,1,100,1
J1(i,1)=Jex2(i,1)
mJ1(i,1)=-Jex2(i,1)
*enddo
!vlozeni druheho pulsu
*do,i,300,400,1
J1(i,1)=-Jex2(i-300,1)
mJ1(i,1)=Jex2(i-300,1)
*enddo

!prirazeni prubehu k plocham
/PREP7
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,8
!*
BFA,P51X,JS,,,%J1%,,
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,9
!*
BFA,P51X,JS,,,%mJ1%,,

```

7.5 Nastavení analýzy

```

/SOL !prepnuti do Solution modu - nastaveni analyzy
kroku=300 !pocet kroku simulace
ANTYPE,4
TRNOPT,FULL

```

```
!*
NSUBST,kroku,0,0
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,1
TIME,T_max
solve           !spusti vypocet ulohy
```

7.6 Postprocessing

```
/POST1           !prepne do Preprocessing modu
krokyb=200       !pocet kroku na delku coilgapu
L=0.3            !delka Rx snimace
hrx1=(h/2)+10e-3 !jednotlive vyskove pozice Rx vinuti
hrx2=(h/2)+5.26e-3
hrx3=(h/2)
hrx4=((h/2)-5.26e-3)
hrx5=((h/2)-10e-3)

!vytvoreni pole hodnot - 10 sloupcu x 300 radku,
!sloupce odpovidaji poctu jednotlivych civek 2x5 (5 poloh, horni a dolni
civka)
*DIM,TOK, TABLE,kroku,10,1,SUBSTEP,
TOK(0,0)=0
TOK(0,1)=0
TOK(0,2)=0
TOK(0,3)=0
TOK(0,4)=0
TOK(0,5)=0
TOK(0,6)=0
TOK(0,7)=0
TOK(0,8)=0
TOK(0,9)=0
TOK(0,10)=0

*do,k,1,kroku,1 !hlavni cyklus, pocet cyklu odpovida poctu kroku
analzy
APPEND, 1, k,    !nacteni k-teho kroku analzy
!tato cast kodu je nutna pro kazdou civku zvlast (10x se opakuje)
PATH,HORNI,2,6,krokyb-1, !definovani cesty horni civky
PPATH,1,0,-c/2,hrx1,,0,  !levy koncovy bod
PPATH,2,0,c/2,hrx1,,0,   !pravy koncovy bod

PDEF, ,B,Y,AVG      !namapovani Y-slozky magneticke indukce B
PCALC,INTG,INT_HOR,BY,XG,L, !vypocet integralu z By podle dx
/PBC,PATH, ,0
PAGET,HORNI1_,TABL !ulozeni hodnot ziskanych na definovane ceste
do pole HORNI1_
PADEL,ALL           !smazani cesty i s hodnotami (pole HORNI1_
!zustava)

!konec opakujici se casti
!prirazovani posledni hodnoty integralu do prislusneho pole vysledku
TOK(k,0)=k !casova osa
TOK(k,1)=HORNI1_(krokyb,6)
TOK(k,2)=DOLNI1_(krokyb,6)
TOK(k,3)=HORNI2_(krokyb,6)
TOK(k,4)=DOLNI2_(krokyb,6)
TOK(k,5)=HORNI3_(krokyb,6)
TOK(k,6)=DOLNI3_(krokyb,6)
TOK(k,7)=HORNI4_(krokyb,6)
TOK(k,8)=DOLNI4_(krokyb,6)
TOK(k,9)=HORNI5_(krokyb,6)
TOK(k,10)=DOLNI5_(krokyb,6)

*DEL, ,PRM_        !smaze vsechny pole vysledku koncici znakem "_"

*enddo             !konec cyklu
zapis_tok          !odkaz na skript pro zapsani pole vysledku do
!souboru .txt
```

7.7 Makro

Výpis makra které ukládá hodnoty do souboru *tok_fi.txt*:

```
*MWRITE,TOK(1,1,1),tok_fi,txt,      !vytvori soubor tok_fi.txt a ulozi do
!nej matici vysletku TOK
(10E13.5)                            !urcuje format zapisu hodnot - 10
!sloupcu cisel o celkove delce 13ti
!znaku, z toho 5 za desetinou teckou
*CFCLOSE                             !uzavre soubor
```

