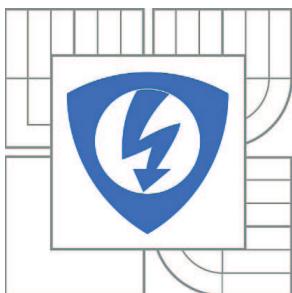


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## **FILTR S AKUSTICKOU POVRCHOVOU VLNOU**

SURFACE ACOUSTIC WAVE FILTER

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

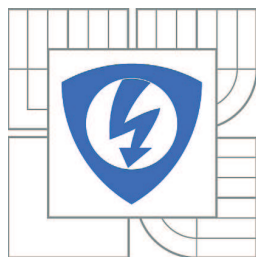
**Bc. JAKUB TICHÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Dr. Ing. ZBYNĚK RAIDA**

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. Jakub Tichý

**ID:** 77850

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2009/2010

## NÁZEV TÉMATU:

### Filtr s akustickou povrchovou vlnou

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem fungování filtrů s povrchovou akustickou vlnou. V COMSOL Multiphysics vytvořte jednoduchý numerický model, kterým bude možno fungování filtru ověřit.

Model filtru zdokonalte, aby se co nejvěrněji podobal reálným filtrům. Model filtru použijte k parametrické analýze. Popište, které stavové proměnné mají největší vliv na vlastnosti filtru.

Numerický model filtru spojte s vhodnou globální optimalizační rutinou. Cílem optimalizace je dosažení co nejvyšší strmosti přenosové charakteristiky filtru. Parametry optimalizovaného filtru porovnejte s parametry filtrů komerčně vyráběných.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CARSTEN D. B., CHRISTENSEN, T. A., WILLATZEN, M. Surface acoustic wave (SAW) generation in Wurtzite and Zincblende piezoelectric materials. In Proceedings of the 2006 Nordic COMSOL Conference [online]. Dostupné na www: <http://cds.comsol.com/access/dl/papers/1605/Carstensen.pdf>

[2] SCHEERSCHMIDT, G., KIRK, K. J., McROBBIE, G. Finite element analysis of resonant frequencies in surface acoustic wave devices. In Proceedings of the 2006 Birmingham COMSOL Conference [online]. Dostupné na www: <http://cds.comsol.com/access/dl/papers/1683/Scheerschmidt.pdf>

**Termín zadání:** 8.2.2010

**Termín odevzdání:** 21.5.2010

**Vedoucí práce:** prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**  
Předseda oborové rady

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Jakub Tichý  
Bytem: Novodvorská 3059, Frýdek-Místek, 738 01  
Narozen/a (datum a místo): 4. ledna 1986 ve Valašském Meziříčí

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika  
(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Filtr s akustickou povrchovou vlnou

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: \_\_\_\_\_

VŠKP odevzdal autor nabyvateli\*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

---

\* hodící se zaškrtněte

## Článek 2

### Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užit, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy  
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## Článek 3

### Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 21. května 2010

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **ABSTRAKT**

Teoretická část této práce se zabývá principy a vlastnostmi filtru s akustickou povrchovou vlnou. Je zde vysvětlen princip magnetostrikce a piezoelektrického jevu, který filtr využívá. V praktické části jsou v programu Comsol Multiphysics vytvořeny tři jednoduché modely SAW filtru. Jsou nalezeny některé vidy a vše je srovnáno s předem známými výsledky. V další fázi práce jsou modely důkladněji zkoumány pomocí parametrických analýz. V poslední fázi práce je aplikována globální optimalizační rutina PSO na admitanční charakteristiku jednoduché 2D struktury. Výsledky jsou porovnány s komerčně vyráběnými součástkami.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Akustická povrchová vlna, filtr, magnetostrikce, piezoelektrický jev, metoda roje částic.

## **ABSTRACT**

The theoretical part of this thesis deals with principles and characteristics of the surface acoustic wave filter. It explained the principle of magnetostriction and piezoelectric effect, which uses a filter. In the practical part in the program Comsol Multiphysics are made three simple models of SAW filter. Some modes are founded and are compared to previously known results. In the next phase of project is further studied using the parametric analysis. In the last phase of project is applied global optimization PSO at admittance characteristic from simple 2D structure. The results are compared with the commercially produced devices.

## **KEYWORDS**

Surface acoustic wave, filter, magnetostriction, piezoelectric effect, particle swarm optimization.

TICHÝ, J. *Filtr s akustickou povrchovou vlnou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 54 s. *Diplomová práce*. Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Filtr s akustickou povrchovou vlnou jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)



# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>vi</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>viii</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teoretická část</b>	<b>2</b>
1.1 Akustická povrchová vlna .....	2
1.2 Zařízení s akustickou povrchovou vlnou .....	3
1.3 Piezoelektrický jev .....	4
1.4 Magnetostrikce.....	4
1.5 Rezonance akustické povrchové vlny .....	6
1.6 Výroba zařízení s akustickou povrchovou vlnou.....	6
1.7 Metoda konečných prvků.....	7
1.8 Optimalizace v elektrotechnice.....	8
1.8.1 Lokální optimalizační metody a genetické algoritmy.....	8
1.8.2 PSO algoritmus .....	10
<b>2 Praktická část</b>	<b>13</b>
2.1 Magnetostrikce 2D.....	13
2.1.1 Úvod do řešení problému.....	13
2.1.2 Modelování struktury.....	14
2.2 Elektrostrikce 2D .....	19
2.2.1 Úvod do řešení problému.....	19
2.2.2 Modelování struktury.....	20
2.3 Elektrostrikce 3D .....	25
2.3.1 Úvod do řešení problému.....	25
2.3.2 Modelování struktury.....	26
2.4 Optimalizace PSO algoritmem .....	30
2.4.1 Úvod do řešení problému.....	30
2.4.2 Výsledky optimalizace.....	32
2.5 Komerčně vyráběné součástky .....	37

<b>3 Závěr</b>	<b>39</b>
<b>Literatura</b>	<b>41</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>43</b>
<b>Přílohy</b>	<b>45</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Akustická povrchová vlna na krystalu oxidu telluričitého (převzato z [2])... 2
Obr. 1.2:	Typický design SAW zařízení (převzato z [2]). ..... 4
Obr. 1.3:	Elektromechanický měnič zastoupený a) paralelním páskovým vedením, b) meandrovým vedením, c) prokládaným vedením (převzato z [5]). ..... 5
Obr. 1.4:	Rozložení magnetických dipólů uvnitř ferromagnetického materiálu a) bez působení magnetického pole a b) během působení magnetického pole (převzato z [5])..... 5
Obr. 1.5:	Postup výroby zařízení s akustickou povrchovou vlnou (převzato z [16]).... 6
Obr. 1.6:	Příklad dvojrozměrné sítě konečných prvků. Modrá čísla značí lokální uzly, červená globální (převzato z [10]). ..... 7
Obr. 2.1:	Modelový navigátor strukturálně mechanického modulu..... 13
Obr. 2.2:	Zjednodušený dvourozměrný model vycházející z reálné struktury (převzato z [5])..... 14
Obr. 2.3:	Rozměry a pozice jedné subdomény..... 15
Obr. 2.4:	Nastavení pro výběr substrátu..... 15
Obr. 2.5:	Vid Lambovy vlny A0 na frekvenci 14,2 MHz. .... 16
Obr. 2.6:	Vid Lambovy vlny S0 na frekvenci 14,5 MHz..... 16
Obr. 2.7:	Vid Lambovy vlny A1 na frekvenci 17,8 MHz. .... 17
Obr. 2.8:	Vid Lambovy vlny S1 na frekvenci 21,1 MHz..... 17
Obr. 2.9:	Vid povrchové akustické vlny na frekvenci 28,9 MHz. .... 18
Obr. 2.10:	Vid povrchové akustické vlny na frekvenci 57,4 MHz. .... 18
Obr. 2.11:	Vid Lambovy vlny na frekvenci 8,4 MHz. .... 19
Obr. 2.12:	Trojrozměrný model struktury se substrátem PZT-5H (převzato z [7]). ..... 20
Obr. 2.13:	2D graf rozložení elektrického potenciálu v antirezonanci na frekvenci 482,3 MHz (PZT-5H). ..... 20
Obr. 2.14:	2D graf rozložení horizontálního mechanického namáhání na frekvenci 482,3 MHz (PZT-5H). ..... 21
Obr. 2.15:	2D graf rozložení vertikálního mechanického namáhání na frekvenci 482,3 MHz (PZT-5H). ..... 21
Obr. 2.16:	2D graf rozložení úplného mechanického namáhání v antirezonanci na frekvenci 482,3 MHz (PZT-5H). ..... 22
Obr. 2.17:	Vid prostorové vlny Bulk na frekvenci 432,8 MHz. .... 23

Obr. 2.18: 2D graf rozložení elektrického potenciálu v rezonanci na frekvenci 475 MHz (PZT-5H). .....	24
Obr. 2.19: 2D graf rozložení úplného mechanického namáhání v rezonanci na frekvenci 475 MHz (PZT-5H). .....	24
Obr. 2.20: Matice konstanty pružnosti niobičnanu lithného. ....	25
Obr. 2.21: Matice vazební konstanty niobičnanu lithného.....	25
Obr. 2.22: Matice relativní permitivity niobičnanu lithného. ....	25
Obr. 2.23: Zjednodušený model 3D struktury (převzato z [8])......	26
Obr. 2.24: 3D graf rozložení horizontálního mechanického namáhání na frekvenci 876 MHz (niobičnan lithný).....	26
Obr. 2.25: 3D graf rozložení vertikálního mechanického namáhání na frekvenci 876 MHz (niobičnan lithný).....	27
Obr. 2.26: 3D graf rozložení úplného mechanického namáhání na frekvenci 876 MHz (niobičnan lithný).....	27
Obr. 2.27: 3D graf rozložení úplného mechanického namáhání při dvojnásobné mezeře mezi elektrodami na frekvenci 636 MHz (niobičnan lithný).....	28
Obr. 2.28: 3D graf rozložení úplného mechanického namáhání při poloviční mezeře mezi elektrodami na frekvenci 1121 MHz (niobičnan lithný).....	29
Obr. 2.29: Výchozí frekvenční závislost admitance. ....	31
Obr. 2.30: Výchozí frekvenční závislost maximální mechanické namáhání ve struktuře. ....	31
Obr. 2.31: Optimalizovaná frekvenční závislost admitance pro 10 iterací a 100 jedinců (A). ....	33
Obr. 2.32: Optimalizovaná frekvenční závislost maximálního mechanického namáhání ve struktuře (A). ....	33
Obr. 2.33: Optimalizovaná frekvenční závislost admitance pro 10 iterací a 100 jedinců (B). ....	34
Obr. 2.34: Optimalizovaná frekvenční závislost maximálního mechanického namáhání ve struktuře (B). ....	34
Obr. 2.35: Optimalizovaná frekvenční závislost admitance pro 10 iterací a 100 jedinců (C). ....	35
Obr. 2.36: Optimalizovaná frekvenční závislost maximálního mechanického namáhání ve struktuře (C). ....	35
Obr. 2.37: Chybová funkce PSO pro 10 iterací a 100 jedinců. ....	36

## SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1:	Tabulka hodnot rychlostí a frekvence vlny pro několik druhů substrátů.....	30
Tab. 2.2:	Tabulka hodnot relativních permitivit výchozí a optimalizované struktury.	32
Tab. 2.3:	Tabulka hodnot frekvence a fázové rychlost vzhledem ke kvalitě sítě konečných prvků.....	37

# ÚVOD

V dnešní době jsou do zařízení stále více implementovány součástky s akustickou povrchovou vlnou, které dokážou nabývat velmi malých rozměrů a velmi dobrých vlastností, např. z hlediska filtrace signálů. Využití právě k filtraci v oblasti mobilní komunikace nebo digitální televize je velmi časté. Dalšími aplikacemi jsou pak senzory dotykových displejů a v neposlední řadě i zpořádací vedení pro radary a jiné komunikační aplikace.

Hlavním předmětem zkoumání této práce jsou vlastnosti filtru s akustickou povrchovou vlnou, a to jak z pohledu teoretického, tak praktického prostřednictvím zvolených výpočetních programů. V programu Comsol Multiphysics jsou namodelovány jednoduché dvojrozměrné modely a také jeden případ trojrozměrné struktury. Tyto příklady znázorňují buzení akustické povrchové vlny pomocí magnetostrikce nebo elektrostrikce na piezoelektrickém substrátu. U trojrozměrného modelu jsou zkoumány vlivy změn stavových proměnných na vlastnosti povrchové vlny, a to převážně fázová rychlost, která je v pevných látkách značná. Parametrickými analýzami jsou vykresleny frekvenční závislosti admitance a maximálního mechanického namáhání ve struktuře. Vzhledem k náročnosti výpočtů dané problematiky a omezené volby modulů programu Comsol Multiphysics nebyla simulována přenosová charakteristika. Z důvodu časové náročnosti výpočtů byl zvolen pouze jednoduchý dvojrozměrný model. Aplikace globální optimalizační rutiny algoritmem PSO byla provedena na admitanční charakteristiku. Při jejich výpočtech byla použita spolupráce programů Comsol Multiphysics a MATLAB. Výsledky jsou závěrem porovnány s parametry komerčně vyráběných komponent.

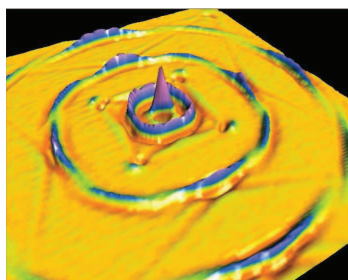
Tato práce je považována spíše jako výchozí bod z hlediska řešení této problematiky, která je v dnešní době aktuální. V dalším navázání je doporučeno vycházet z modelových struktur, vhodně jednu z nich zvolit a modelovat komplexněji. Zvláště pak si zaslouží pozornost možná provázanost přenosové charakteristiky, resp. útlumu s admitancí a mechanickým namáháním ve struktuře.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část této práce obsahuje převážně informace pro seznámení se s akustickou povrchovou vlnou, zařízeními, která s touto vlnou pracují a principy, na kterých je vše postaveno. V praktické části je pak většina experimentů prováděna v programu Comsol Multiphysics a zde v teoretické části je tedy naznačen postup výpočtů metody konečných prvků používané programem. Oblast teorie je završena objasněním algoritmu PSO, kterého je využito při závěrečné optimalizaci modelové struktury při provázanosti programů Comsol Multiphysics a MATLAB.

## 1.1 Akustická povrchová vlna

Akustická povrchová vlna (SAW) představuje akustickou vlnu pohybující se podél povrchu pružného materiálu, jejíž amplituda typicky exponenciálně klesá s hloubkou vniku do substrátu. Tato vlna bývá obvykle využita v SAW zařízeních v elektronických obvodech, jako jsou převážně filtry, oscilátory nebo transformátory. Změnu elektrické energie na mechanickou ve formě povrchové akustické vlny zajišťuje piezoelektrický materiál. Akustickou povrchovou vlnu, též někdy zvanou Reyleighovu vlnu, objevil již v roce 1887 Lord Reyleigh. Ve své práci tehdy předpověděl její vlastnosti, a to, že vlna má podélnou a vertikální složku, která vzniká rozechvěním materiálu, na kterém je součástka připevněna. Amplituda a rychlost povrchové vlny se liší v použitém materiálu a snímáním těchto hodnot lze zpětně určit vlastnosti materiálu nebo okolního prostředí. SAW součástky jsou obvykle tvořeny jedním nebo více interdigitálními měniči (palcovými převodníky) potřebnými k přeměně akustické vlny na elektrický signál a naopak, a to vše s využitím piezoelektrického jevu. Materiály, které tento jev podporují, jsou např. křemen, niobičnan lithný, tantaličnan lithný, a další. Tato zařízení jsou vyráběna na základě fotolitografie, což je proces výroby křemíkových integrovaných obvodů. Na obr. 1.1 lze zřetelně vidět akustickou povrchovou vlnu na krystalu oxidu telluričitého.



Obr. 1.1: Akustická povrchová vlna na krystalu oxidu telluričitého (převzato z [2]).

Nesmírnou výhodou SAW vlny je nízký útlum vlny při průchodu pevným materiálem. Kromě toho nemá vlna rozptylující charakter a zachovává si tedy konstantní rychlost i vzhledem k měnící se frekvenci. Navíc fakt, že se vlna dokáže pohybovat s relativně nízkou rychlostí (řádově  $10^3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), jí v porovnání s elektromagnetickou vlnou dělá zajímavější pro aplikace zabývající se zpracováním

signálu. Aplikace jako jsou filtry nebo zpožďovací vedení mohou dosáhnout mnohem menších rozměrů.

SAW filtry jsou v dnešní době využívány v mobilních telefonech a představují významnou výhodu ve výkonu, ceně a velikosti oproti ostatním technologiím filtrů, jakými jsou např. křemenné filtry (založené na šíření hromadné vlny), LC filtry nebo vlnovodové filtry.

Největší rozvoj nastal v posledních 20 letech v oblasti zaměřující se na senzory s akustickou povrchovou vlnou, které byly postupně zařazeny do téměř všech odvětví měření (chemikálie, optika, teplota, tlak, zrychlení, moment síly a biologie). SAW senzory našly zatím nejlepší komerční uplatnění pro aplikace, jako jsou např. dotykové displeje.

Významný vliv má akustická povrchová vlna pohybující se podél Zemského povrchu v seizmologii, kde vznik seizmické vlny může vést až k zemětřesení. Informace je převzata z [2].

## 1.2 Zařízení s akustickou povrchovou vlnou

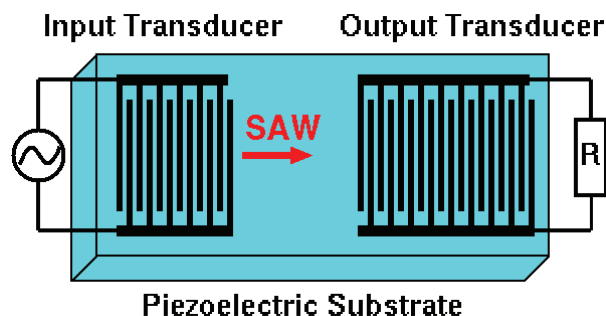
SAW součástky se obvykle používají v rozmezí frekvencí od 10 – 2000 MHz, s šířkou pásma od 0,1 – 500 MHz a s délkou impulsní odezvy do 100  $\mu$ s. V mnoha aplikacích nabízejí vlastnosti, které nelze srovnat s jinými technologiemi. Filtr typu pásmová propust s akustickou povrchovou vlnou je používán především k oddělení signálů podle frekvence, což je základní a velmi běžný požadavek v mnoha analogových systémech. Výhodou oproti tradičním technologiím pro výrobu pásmových propustí je jejich malá velikost a stabilita i ve špatných podmínkách okolního prostředí.

SAW rozptylovací a zpožďovací vedení jsou užívána pro speciální funkce zpracování signálu v radarech a komunikačních aplikacích. Oproti filtrům roste u těchto zařízení rovnoměrně se zpožděním i šířka pásma propustnosti. Tohoto efektu může být využito ke zvýšení rozsahu a rozlišovací schopnosti radarů, ke zvyšování rychlosti a rozlišovací schopnosti výkonných armádních sledovacích přijímačů (převzato z [4]).

Akustická povrchová vlna může být generována mnoha způsoby, z nichž interdigitální měnič (IDT) se ukázal být ideální a přizpůsobený k implementaci do SAW zařízení a aplikacím pro zpracování signálů. Interdigitální měnič u SAW zařízení se skládá ze dvou sousedících elektrod zastoupených kovovými pásky, které jsou umístěny na povrchu piezoelektrického substrátu. Tyto elektrody jsou od sebe umístěny v určité vzdálenosti, což má za důsledek vznik elektrického pole na povrchu. Samotná akustická povrchová vlna je vytvářena nejčastěji inverzním piezoelektrickým jevem, přičemž jeden elektrodový pár zajistí menší elektrický náboj  $Q$  a širokopásmovou odezvu. S přibývajícím počtem elektrodových párů se střídající se polaritou je možné rezonanci zaostřit a zužit tak frekvenční pásmo. Systém rezonuje tehdy, když se vlnová délka rovná vzdálenosti mezi dvěma elektrodovými páry a příspěvek od všech elektrodových párů se sčítá ve fázi. Pokud frekvence není v rezonanci, pak příspěvky jednotlivých elementárních dvojic nejsou ve fázi a odezva je tedy menší. S více elektrodovými páry je rezonance ostřejší a elektrický náboj větší (převzato z [6]).

IDT může být popsán mnoha odlišnými modely a ekvivalentními obvody. Na obr. 1.2 je vyobrazen příklad typického modelu filtru s akustickou povrchovou vlnou.





Obr. 1.2: Typický design SAW zařízení (převzato z [2]).

### 1.3 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev se vyskytuje u pevných krystalických soustav, které mají anizotropní charakter a jsou středově nesouměrné. Přímý piezoelektrický jev je podmíněn mechanickým namáháním materiálu. V podstatě je to schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformaci. Krystal je elektricky polarizován a na jeho povrchu vzniká elektrický náboj  $Q$ , který je v tomto případě zastoupen kladnými i zápornými ionty. Mechanické namáhání může být vyvoláno např. tlakem, tahem, ohybem nebo kroucením. Obdobně funguje i obrácený (reciproký) piezoelektrický jev, též nazývaný elektrostrikce. Působením vnějšího elektrického pole dochází k posunutí iontů a tím i k deformaci krystalu daného materiálu. Samozřejmostí je přímá úměrnost změny rozměrů a přiloženého, resp. vznikajícího elektrického pole. Avšak při určitých vysokých teplotách dochází u každého materiálu ke ztrátě piezoelektrických vlastností. Jakmile teplota překročí Curieovu teplotu, je narušeno uspořádání iontů, což je pro tento jev nežádoucí. V případě zapojení krystalu na střídavé napětí je možné získat i zdroj zvuku nebo ultrazvuku. Frekvence těchto zvuků je závislá hlavně na frekvenci budícího střídavého napětí a samozřejmě materiálu krystalu (převzato z [3]).

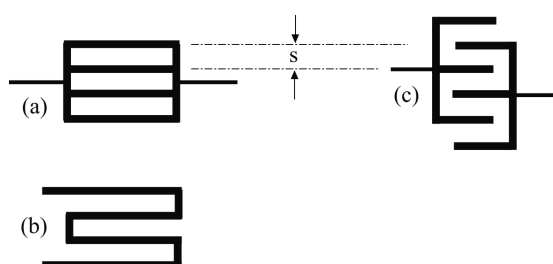
Z hlediska rozložení atomů, iontů a molekul v krystalové mříži jsou krystalové soustavy děleny do krystalografických soustav. Podle vlastností jednotlivých elementárních buněk se rozlišuje sedm krystalografických soustav, přičemž piezoelektrické vlastnosti vykazují jen některé z nich. Křemen je typickým představitelem této skupiny. Existují dvě cesty, jak jej získat, a to přírodní a syntetická, přičemž u druhé z těchto možností je dosaženo větší čistoty a tvoří převážnou část vhodnou pro další zpracování. Dalšími látkami z této kategorie jsou např. niobičnan lithný nebo tantaličnan lithný.

Piezoelektrická keramika je polykrystalická látka, ve které se shlukují nahodile orientované piezoelektrické krystaly. Tato látka se navenek nejeví jako piezoelektrická, avšak po jejím vystavení elektrickému poli nastává polarizace. Polarizace ve směru polarizujícího elektrického pole má taky za důsledek změnu izotropie ve struktuře polykrystalu (převzato z [14]). Známými materiály z této oblasti jsou např. PZT-5H, PZT-8 či jiné sloučeniny titanu.

### 1.4 Magnetostrikce

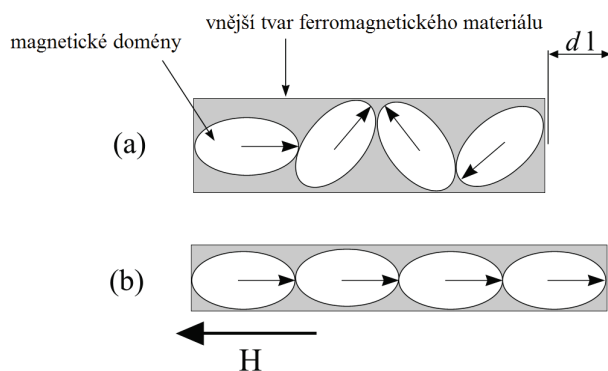
Magnetostrikcí aktivované zařízení má oproti piezoelektrickému jevu několik zásadních

výhod, a to nízkou teplotu kovového filmu, jednoduchou výrobu a nízkou spotřebu. U magnetostrikce jsou možné dva způsoby nanesení kovového filmu. Na obr. 1.3a je příklad prvního měniče, který je zastoupen paralelním páskovým vedením a na obr. 1.3b je druhý případ měniče jako meandrového vedení. Třetí případ uvedený na obr. 1.3c nevyužívá magnetostrikce, nýbrž piezoelektrického jevu. Důležité pro uplatnění magnetostrikce je zajistit elektrický proud protékající elektrodou; ten vytváří periodické magnetické pole okolo elektrodového prstu, jehož důsledkem vzniká magneto-mechanický jev, který generuje akustickou povrchovou vlnu. Navíc piezoelektrický IDT má stejnou mezeru mezi elektrodovými prsty  $S$  jako magnetické SAW zařízení, avšak poloviční vlnovou délkou. Informace v této podkapitole je převzata z [5].



Obr. 1.3: Elektromechanický měnič zastoupený a) paralelním páskovým vedením, b) meandrovým vedením, c) prokládaným vedením (převzato z [5]).

Magneto-mechanický jev vychází z magnetostrikčního jevu, díky němuž se ve ferromagnetickém materiálu mění objemové vlastnosti vzhledem k přiloženému magnetickému poli. Změnu orientace dipólů uvnitř ferromagnetického materiálu po přiložení magnetického pole je možné názorně pozorovat na obr. 1.4. Tmavě šedá barva značí ferromagnetický materiál, ve kterém jsou náhodně rozmístěny magnetické dipóly. Dipóly zřetelně reagují působením magnetického pole a rovnají se do řady, přičemž jejich orientace je proti směru působení magnetického pole  $H$ . Namáhání a tlak vyplývající z rozšiřování a stahování materiálu se projeví po celé délce substrátu. Výsledná změna rozměrů  $dl$  je největší v rezonanci (viz. obr. 1.4b).



Obr. 1.4: Rozložení magnetických dipólů uvnitř ferromagnetického materiálu a) bez působení magnetického pole a b) během působení magnetického pole (převzato z [5]).

## 1.5 Rezonance akustické povrchové vlny

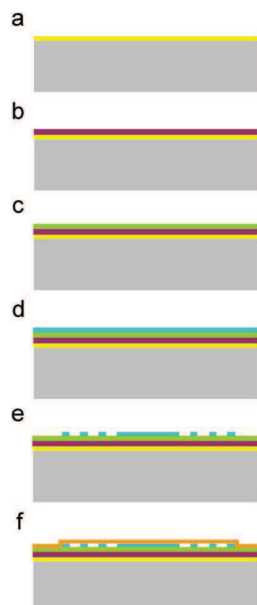
Rezonance jako taková je schopnost systému oscilovat s vyšší hodnotou amplitudy dané veličiny na určité frekvenci, která se z toho důvodu nazývá rezonanční. Dokonce i malá síla může vyvolat v systému velkou amplitudovou rezonanci. Jev rezonance se vyskytuje ve všech oblastech, kde se vyskytují nějaké známky vibrací nebo vln. Jsou to např. mechanická, akustická, elektromagnetická, nukleární magnetická rezonance, a pak také rezonance elektronového spinu.

Rezonanci v elektrických obvodech lze dosáhnout vhodným propojením kondenzátoru a induktoru, přičemž samotná rezonance nastává sériová nebo paralelní. V některých literaturách jsou tyto dva jevy označeny také jako rezonance a antirezonance. Jestliže je hodnota impedance minimální (admitance maximální), pak nastává rezonance a v opačném případě antirezonance [2][15].

Tyto skutečnosti se promítanou také na strukturu substrátu využívající elektrostrikce. Konkrétní vidy povrchové akustické vlny jsou nejintenzivnější právě na diskretních hodnotách frekvence. Akustická povrchová vlna je v piezoelektrických materiálech zvláštním případem, poněvadž většinou se zde šíří prostorová Lambova vlna. Dalším zvláštním případem je prostorová vlna Bulk. Oba případy prostorových vln jsou prezentovány v praktické části.

## 1.6 Výroba zařízení s akustickou povrchovou vlnou

Součástky postavené na šíření akustické povrchové vlny jsou dnes využívány v různých oblastech elektrotechniky. Tyto komponenty dosahují velmi dobré vlastnosti v oblasti pásmové filtrace (DVB, mobilní telefony). Na následujícím obr. 1.5 je naznačen postup při výrobě mikrovlnné struktury SAW filtru.



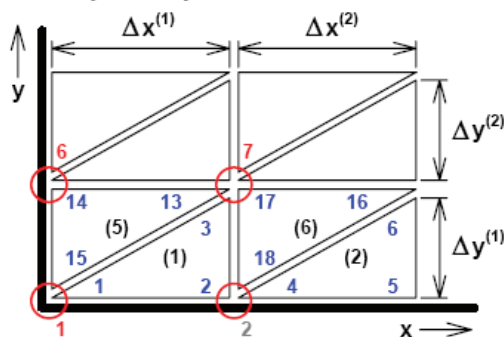
Obr. 1.5: Postup výroby zařízení s akustickou povrchovou vlnou (převzato z [16]).

Na obr. 1.5a je na šedý substrát nejprve napařena oxidací vrstva křemíku s tloušťkou 1  $\mu\text{m}$  při teplotě 1000  $^{\circ}\text{C}$ . Dalším krokem je chemické napaření tenké vrstvy nitridu za podmínky velmi nízkého tlaku a teploty. Tato metoda je v literaturách uváděna pod zkratkou LPCVD (obr. 1.5b). Plynné látky, které při tomto jevu asistují, jsou amoniak a dichlorsilan. Ve třetím kroku je provedeno vysokofrekvenční pokovení rozprašováním (obr. 1.5c). Tímto je nanášena vrstva oxidu zinku o tloušťce 5  $\mu\text{m}$ . Na vrstvu oxidu přichází poté 1  $\mu\text{m}$  tlustá vrstva hliníku, která je opět nanášena vysokofrekvenčním pokovováním a litografickou metodou jsou vytvářeny vstupní a výstupní interdigitální měniče (obr. 1.5d, e). Na závěr je ještě povrch překryt velmi tenkou vrstvou oxidu křemičitého s tloušťkou 0,3  $\mu\text{m}$  pro lepší chemickou provázanost předchozích vrstev a je provedena druhá litografie (obr. 1.5f). Informace je převzata z [16].

## 1.7 Metoda konečných prvků

Tato část se bude věnovat metodě konečných prvků, kterých využívá program Comsol Multiphysics. Metoda konečných prvků je obecná numerická metoda pro řešení parciálních diferenciálních rovnic. Základní postup při výpočtu je prezentován pro rozložení pole ve vlnovodu a lze jej shrnout do několika kroků [10]:

1. Profil vlnovodu se rozdělí na konečné prvky, přičemž v případě podélně homogenního to budou malé trojúhelníky, jejichž vrcholy jsou nazývány uzly, viz. obr. 1.6.



Obr. 1.6: Příklad dvojrozměrné sítě konečných prvků. Modrá čísla značí lokální uzly, červená globální (převzato z [10]).

2. Rozložení podélné složky elektrické intenzity vidu TM a magnetické vidu TE je formálně aproximováno nad každým konečným prvkem, resp. funkce je vyjádřena pomocí neznámých hodnot intenzity v uzlech a známých básových funkcí (lineárních, kvadratických, kubických). Každá básová funkce nabývá jednotkové hodnoty v jednom uzlu a nulové v ostatních.
3. Formální aproximace je dosazena do výchozího vztahu, tj. do řešené rovnice. Ke vztahu je poté přičtena chybová funkce, tzv. reziduum (které vzhledem k přesnosti aproximace by mělo být co nejmenší), poněvadž samotná formální aproximace není příliš přesná.

4. Minimalizace reziduí je provedena vynásobením rezidua vhodnou váhovou funkcí a integrováním tohoto součinu přes celý profil analyzovaného vlnovodu. Dosazením bazových funkcí všech uzlů za váhové vznikne  $N$  rovnic o  $N$  neznámých, tzv. Galerkinova metoda.
5. Vyřešením dané matice rovnic tzv. zobecněného problému vlastních čísel jsou získány hodnoty dosud neznámých uzlových intenzit. Výsledkem je vektor vlastních čísel (vektor kvadrátů kritických vlnových čísel jednotlivých vidů) a matice odpovídajících vlastních vektorů (uzlové hodnoty podélných složek intenzit jednotlivých vidů).
6. Po dosazení uzlových hodnot do formální aproximace je výsledkem aproximační funkce podélné složky intenzity v každém bodě profilu analyzovaného vlnovodu. Z té pak lze spočítat všechny ostatní složky vektorů intenzity elektrického i magnetického pole.

Toto je pouze základní naznačení metody konečných prvků, ovšem při praktických výpočtech se postupuje poněkud jinak. V literatuře lze vyhledat již hotové matice koeficientů určených pro konkrétní normovaný konečný prvek. Matice se poté upraví pro daný konečný prvek a spojí spolu s ostatními konečnými prvky do sítě.

## 1.8 Optimalizace v elektrotechnice

### 1.8.1 Lokální optimalizační metody a genetické algoritmy

Optimalizace je metoda hledání nejvhodnějšího řešení, při které se mění tzv. stavové proměnné optimalizovaného objektu, a pozoruje se vliv na výsledných parametrech. Optimalizace jsou prováděny, dokud není dosaženo požadovaných (optimálních) parametrů nebo alespoň do přiblížení se k nim a lze je rozdělit na optimalizace neomezené, kdy se stavové prvky mohou měnit bez jakéhokoliv omezení a optimalizace omezené, kdy jsou zavedeny jisté omezující podmínky. Optimalizační problém lze tedy vyjádřit jako minimalizaci podle určitých parametrů, kde vektor  $x$  je prvkem  $n$ -rozměrného reálného prostoru [12]:

$$\min_{x \in R^n} F(x). \quad (1)$$

Pro takovou minimalizaci lze použít kriteriální funkci  $F(x)$  jako součet kvadrátů odchylek mezi aktuálními a požadovanými hodnotami parametrů [12]:

$$F(x) = \sum_{i=1}^m [y_i(x) - d_i]^2. \quad (2)$$

Aktuální hodnoty parametrů a minimalizovaná kritériální funkce závisí na sloupcovém vektoru stavových proměnných [12]:

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]. \quad (3)$$

V případě omezené optimalizace se zavádějí optimalizační podmínky, které lze obecně vyjádřit [12]:

$$c_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, k', \quad (4)$$

$$c_i(x) \geq 0, \quad i = k'+1, \dots, k. \quad (5)$$

Pro případ (4) definujeme  $k'$  omezení rovností, přičemž funkce stavových proměnných musí být rovna nule. Pro případ (5) je funkce stavových proměnných větší nebo rovna nule a při vynásobení hodnotou -1 menší nebo rovna nule. Ve výše uvedených vztazích zastupuje stavové proměnné  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , parametry optimalizovaného problému  $y_1, y_2, \dots, y_n$  a žádané hodnoty těchto parametrů  $d_1, d_2, \dots, d_n$ . Klasifikace optimalizačních problémů se provádí na základě formulací kritériálních funkcí (nejjednodušší je funkce jedné proměnné) a omezujících podmínek (nejjednodušší je bez omezujících podmínek) a hraje důležitou roli při výběru vhodné optimalizační metody. Podobným způsobem jako lze klasifikovat optimalizační úlohy, lze klasifikovat i optimalizační metody. Jedno z rozdělení je například na globální a lokální. Nevýhodou lokálních metod je schopnost najít globální minimum pouze v blízkém okolí počáteční pozice a může tedy dojít k „uváznutí“ v minimu lokálním. Tento problém jsou však metody globální schopny překonat, ale jejich nevýhodou je pro změnu vyšší výpočetní náročnost. Mezi nepoužívanější globální optimalizační metody patří hlavně genetické algoritmy (GA), u kterých není kladen žádný velký požadavek na kritériální funkci, nýbrž jde spíše o to, aby byl výpočet rychlý, poněvadž se mnohokrát opakuje. Stavové veličiny mohou být spojité nebo diskrétní, avšak pokud jsou spojité, je nutná diskretizace. Mezi nejvíce používanými optimalizačními metodami pracujícími s genetickými algoritmy jsou dva zásadní rozdíly:

1. GA pracují se symbolickou reprezentací parametrů systému, které se nazývají chromozomy (sled nul a jedniček s délkou rovnající se počtu alel v jednom genu násobených počtem parametrů).
2. GA neoptimalizují najednou jediné řešení, ale pracují současně s celou skupinou různých řešení nazývaných se populace (vytvořených ze skupiny chromozomů, každý prvek je označován jako jedinec).

Na začátku dojde k vytvoření výchozí populace a samotná optimalizace spočívá ve zkvalitňování výměnou jedinců (nikoliv změnou počtu). Každá nová populace vytváří další novou generaci. Převzato z [12].

### 1.8.2 PSO algoritmus

K dalším globálním metodám optimalizace patří algoritmus PSO, což je optimalizace pracující na principu včelího roje, která bývá zpravidla efektivnější při hledání globálního minima nelineárních funkcí než genetické algoritmy. Každé řešení se skládá z množiny parametrů a reprezentuje bod v dimenzionálním prostoru. Optimalizace metodou včelího roje, k němuž je použit algoritmus PSO, je robustní pseudonáhodná výpočetní technika zakládající se na pohybu a inteligenci včelího roje. Tato metoda ukazuje, jak efektivně optimalizovat obtížnou nespojitou mnohorozměrnou problematiku ve variantách polí. V roce 2002 byla na konferenci předvedena úspěšná aplikace této metody při návrhu antény. Při aplikaci lze na PSO analogicky nahlížet jako na včelí roj hledající květiny na louce. Úkolem včel je najít na louce oblast s největší hustotou květin. Na začátku jsou včely v náhodné oblasti s náhodnou rychlostí na poli. Každá včela si může zapamatovat místo, kde našla nejvíce květin a nějakým způsobem ví i o oblastech, kde našly ostatní včely hojnost květin. Čím více informací má včela o tom, kde našla nejvíce květin a kde našly ostatní včely nejvíce květin, tím více zrychluje změny své trajektorie. Jestliže je nalezena oblast s novou nejvyšší koncentrací květin, přelétne tuto oblast celý roj a poté je tažen zpět k předešlým. Tímto způsobem stále kontrolují všechna místa, kde byla nalezena lokální maxima s domněním, že najdou absolutní maximum, ke kterému jsou neustále přitahovány. Nakonec všechny včely krouží kolem tohoto globálního maxima. Dále je uveden slovník termínů algoritmu PSO použitý při výpočtu:

- *Particle nebo Agent* je jedinec v roji. Každý jedinec má za úkol urychlit svůj pohyb směrem k nejlepší osobní a nejlepší celkové poloze, zatímco kontroluje aktuální umístění.
- *Location nebo Position* představují souřadnice jedince v N-rozměrném prostoru. Tyto souřadnice reprezentují řešení daného problému v definovaném prostoru.
- *Swarm* je celkové seskupení jedinců (roj).
- *Fitness* neboli kritériální funkce reprezentuje hodnotu nejlepší vypočtené pozice. Tato funkce udává vztah mezi fyzickým problémem a algoritmem optimalizace.
- $p_{best}$  je pozice v početním prostoru s nejlepším fitness pro daného jedince. Tato pozice je stále porovnávána s aktuálním umístěním jedince, a jakmile se objeví místo s lepším fitness, je touto hodnotou přepsána.
- $g_{best}$  je pozice v početním prostoru s nejlepším fitness pro celý roj. Tato pozice je jediná pro celý roj a je to nejlepší hodnota fitness vybraná ze všech  $p_{best}$ . Jakmile



je jedincem nalezeno nové  $p_{best}$ , které má lepší fitness než  $g_{best}$ , tak je nahrazeno touto hodnotou.

- $v_{max}$  je největší povolená rychlost jedince v daném směru.

Samotný výpočetní algoritmus lze stručně popsat takto:

1. Nejprve se definuje početní prostor. Prvním krokem je vybrání parametrů, kterým je třeba dát racionální rozsah, a tedy minimální ( $Xmin_n$ ) a maximální ( $Xmax_n$ ) příslušné hodnoty, kterých může dosáhnout při samotném řešení, kde  $n$  může nabývat hodnot od 1 do  $N$  v  $N$ -rozměrném prostoru.
2. Druhý krok je definování kritériální funkce, která je důležitá při propojení optimalizačního algoritmu a řešeného problému. Tento krok je velmi důležitý. Musí být vhodně zvolena specifická funkce pro danou optimalizaci.
3. Inicializace náhodné počáteční polohy roje a jejich rychlostí (jak směr, tak velikost). Počáteční poloha každého jedince se stává ihned jeho  $p_{best}$ , přičemž je dále toto lokální maximum srovnáváno s aktuální hodnotou. Ze všech počátečních  $p_{best}$  je vybráno  $g_{best}$ , které je také porovnáváno při každé změně  $p_{best}$  některého z jedinců.
4. Následuje systematický let všech jedinců řešeným prostorem, který je aplikován na každého jedince individuálně:
  - a) Kritériální funkce zpracovává souřadnice jedince a vrací hodnotu *fitness*, která je porovnávána s  $p_{best}$  jedince a následně  $g_{best}$  celého roje. Případně dojde k přepsání těchto hodnot při splnění podmínek.
  - b) Hlavním prvkem celé optimalizace je manipulace s rychlostmi jedinců, které se mění podle relativního umístění  $p_{best}$  a  $g_{best}$ . Každý další pohyb je popsán rovnicí rychlosti [11]:

$$v_{n+1} = wv_n + c_1 rand() \cdot (p_{best,n} - x_n) + c_2 rand() \cdot (g_{best,n} - x_n). \quad (6)$$

Zde  $v_n$  je rychlost jedince a  $x_n$  jsou jeho souřadnice v  $n$ -tém rozměru,  $w$  je vážený faktor pro starou rychlost (nakolik zůstane směr jedince neovlivněn) a  $c_1$  a  $c_2$  jsou mírou relativního tahu k  $p_{best}$  a  $g_{best}$ .  $c_1$  a  $c_2$  udávají, jakou měrou jsou ovlivněni jedinci a celý roj vzpomínkou na jejich nejlepší umístění. Funkce náhodného čísla  $rand()$  může nabývat hodnot v rozmezí od 0 do 1. Zavedením náhodné funkce do optimalizace má za cíl simulovat nepatrnou nepředvídatelnou součást přirozeného chování roje. Díky těmto náležitostem jedinci, kteří jsou vzdálenější od  $g_{best}$  nebo  $p_{best}$  více, se k nim začnou více orientovat než jedinci, kteří



jsou blíž.

- c) V dalším kroku jsou spočteny nové souřadnice jedince podle vztahu [11]:

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \cdot v_{n+1}. \quad (7)$$

Zde jsou  $x_n$  opět souřadnice jedince v  $n$ -tém rozměru,  $v_{n+1}$  nová rychlost jedince a  $\Delta t$  je krok odpovídající jedné iteraci, a tedy době změny pozice jedince.

5. Celý proces se opakuje, dokud není nalezeno optimální řešení nebo dokud neproběhne zadaný počet iterací.

Zkušenosti ukázaly, že zavedení  $v_{max}$ , vážených faktorů  $c_1$  a  $c_2$  a inerčního faktoru  $w$  ne vždy omezily jedince v daném prostoru, a proto byly zavedeny tři různé okrajové podmínky:

- Absorbing walls – když jedinec „narazí“ do hranice řešeného prostoru jedné z dimenzí, jeho energie je absorbována, rychlost se vynuluje a jedinec je tažen zpět do řešeného prostoru.
- Reflecting walls – když jedinec „narazí“ do hranice jedné z dimenzí, jeho rychlost se mění a jedinec se odráží zpět do řešeného prostoru.
- Invisible walls – jedinci mohou proletět za hranice řešeného prostoru, avšak není ohodnocena jejich fitness.

Všechny výše uvedené náležitosti jsou základní informace k aplikování PSO algoritmu v praxi k řešení globálních optimalizačních problémů. Tento text je převzat z článku [13].

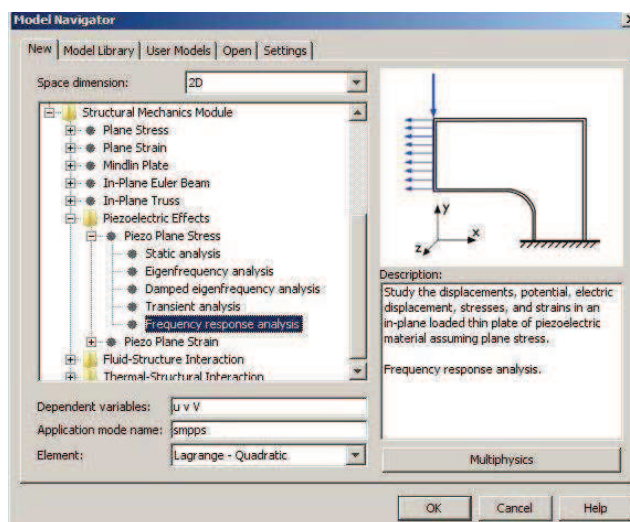
## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

Tato část je věnována několika příkladům vybuzení povrchové akustické vlny na piezoelektrickém substrátu. Pro jednoduchost a názornost je vše namodelováno nejprve dvourozměrně. První modelové řešení se věnuje nalezení rezonančních frekvencí pro některé vidy Lambovy vlny a povrchové akustické vlny na křemíkovém substrátu. V druhém případě je výsledkem nalezení SAW a Lambovy vlny při použití substrátu PZT-5H (piezokeramika). Třetí případ je již trojrozměrný a stejně jako v druhém případě je zobrazeno také rozložení elektrického potenciálu ve struktuře. Je to poslední případ vybuzení SAW vlny, přičemž jako substrát je použit niobičnan lithný. Všechny tyto případy jsou inspirovány články z konferencí COMSOL a jsou v nich použity strukturálně mechanické moduly programu Comsol Multiphysics. Výsledky jsou zobrazeny v grafech frekvenční závislosti maximálního mechanického namáhání ve struktuře a její vzájemné propojení s parametrem admitance. V neposlední řadě je aplikována globální optimalizační rutina na zvolený průběh admitanční frekvenční charakteristiky a na závěr je nahlédnuto do oblasti komerčně vyráběných součástek a jejich reálných parametrů.

Program Comsol Multiphysics je produktem švédské firmy Comsol. Následující numerické experimenty budou prováděny ve verzi 3.4. Předěšlé verze byly známy pod názvem FEMLAB, které dokonce do verze 3.0 fungovaly jen jako nadstavba programu MATLAB. Program je určen k řešení parciálních diferenciálních rovnic metodou konečných prvků.

### 2.1 Magnetostrikce 2D

#### 2.1.1 Úvod do řešení problému

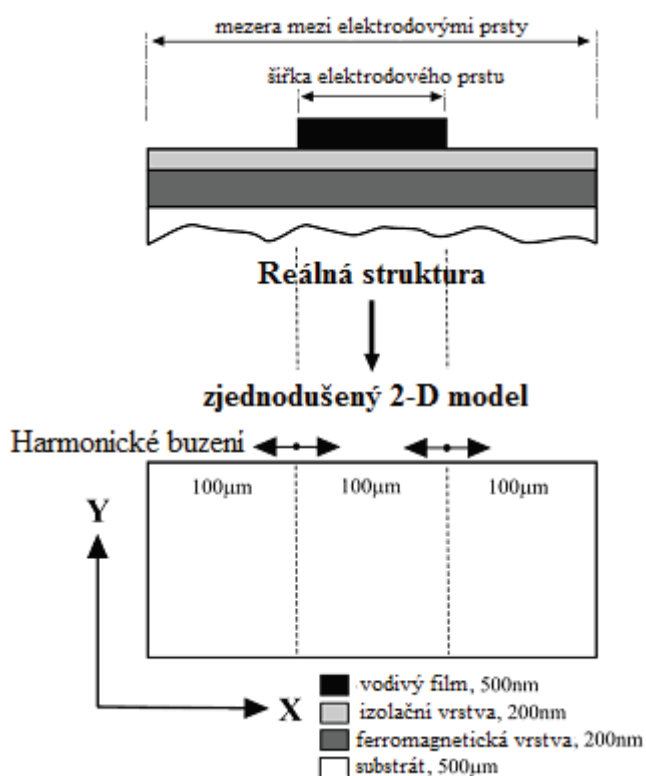


Obr. 2.1: Modelový navigátor strukturálně mechanického modulu.

Modelování magnetostrikce je velmi podobné modelování základních struktur technologie MEMS. Magnetostrikcí aktivované zařízení s akustickou povrchovou vlnou je nutné modelovat komplexněji, a proto k vyšetření jeho rezonančních frekvencí muselo dojít k určitému zjednodušení modelu. Na obr. 2.1 je zobrazen modelový navigátor, který je k této analýze využit, přičemž pro nalezení jednotlivých rezonančních frekvencí je použit mód *Eigenfrequency analysis*.

Tímto modulem je ovšem možné nalézt rezonanční frekvence. Podrobnější zkoumání frekvenčního okolí a použití parametrických analýz je podmíněno výběrem modulu *Frequency response analysis*. Následující modelování je srovnáváno s výsledky dosaženými v [5].

Samotné zjednodušení spočívá v tom, že je reálná struktura modelována pouze dvěma rozměry. Další časovou úsporou pro výpočet je modelování co možná nejmenší možné struktury. Navíc je vhodné tuto strukturu ještě rozdělit na několik shodných menších částí. Struktura má tedy tloušťku substrátu 500  $\mu\text{m}$ , šířku elektrodového prstu 100  $\mu\text{m}$  a vzdálenost mezi jednotlivými prsty elektrod 300  $\mu\text{m}$ . Zjednodušený 2D model jasně prezentuje obr. 2.2.

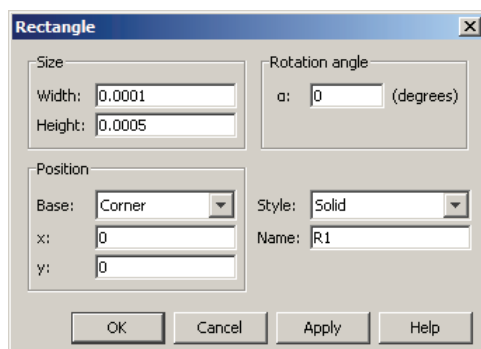


Obr. 2.2: Zjednodušený dvourozměrný model vycházející z reálné struktury (převzato z [5]).

### 2.1.2 Modelování struktury

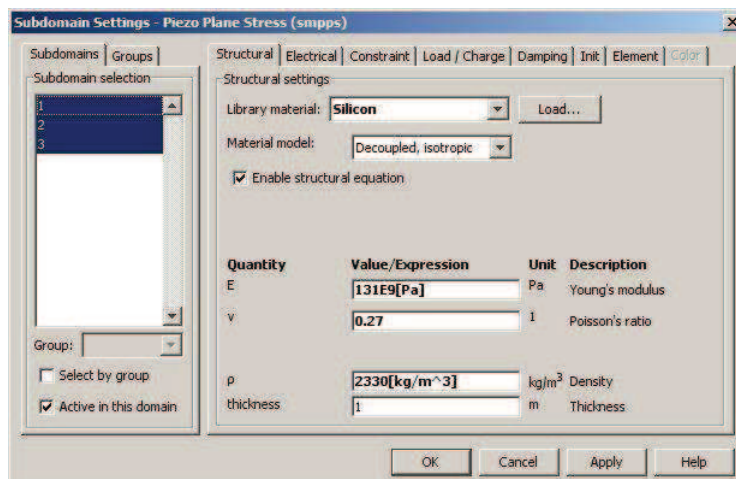
V případě modelování struktury v programu Comsol Multiphysics je daný objekt namodelován jako obdélníkový příčný řez strukturou, která je rozdělena na tři stejně velké subdomény s šířkou 100  $\mu\text{m}$ . Toto se provede přes menu *Draw / Specify Objects / Rectangle*, kde se postupně namodeluje každá subdoména zvlášť (viz. obr. 2.3).

Všechny tři části se spojí v kompozit v menu *Draw / Create Composite Object*, což ovšem není nutné.



Obr. 2.3: Rozměry a pozice jedné subdomény.

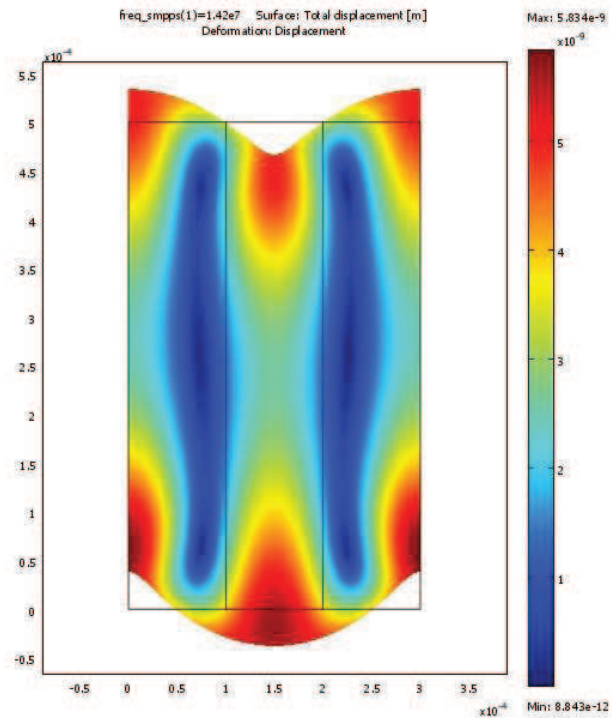
V dalším kroku je zvolen substrát, na němž je umístěn kovový film. Substrátem je v tomto případě zvolen křemík, a to přes menu *Physics / Subdomain Settings*, kde je v knihovně nalezen materiál s požadovanými parametry (viz. obr. 2.4). Důležitým nastavením jsou okrajové podmínky, které se nacházejí v menu *Physics / Boundary Settings*. Zde se přiřadí levé a pravé vertikální straně omezující podmínka *Roller*, což je podmínka zabráňující mechanickému pohybu ve směru kolmém na danou stranu. Hranice ležící mezi subdoménami a zbylé hranice na vrchní a spodní straně objektu dostanou přiřazenu podmínku *Free*. Tato podmínka bývá přednastavena a neomezuje pohyb v jakémkoliv směru.



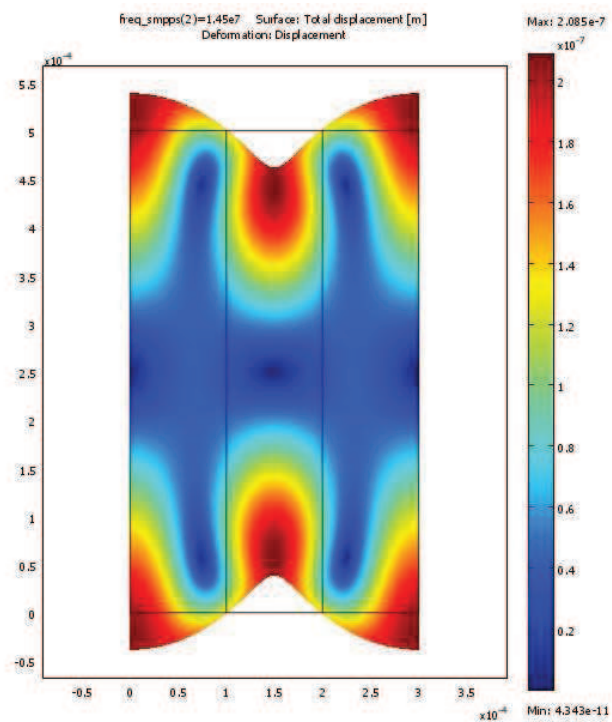
Obr. 2.4: Nastavení pro výběr substrátu.

Dále následují základní kroky pro nalezení jednotlivých vidů a jejich přibližných rezonančních frekvencí v modulu *Eigenfrequency*. Přes menu *Postprocessing / Plot Parameters* je možné zobrazit v grafech spojení horizontálního a vertikálního mechanického namáhání, nazvané *Total displacement*. Do téhož grafu je také možno přidat zobrazení míry deformace. Výsledkem je soubor vybraných vidů Lambovy vlny zobrazených níže (viz. obr. 2.5, 2.6, 2.7, 2.8). V tomto modulu je výsledkem pouze rozložení úplného posunutí, resp. namáhání, a míra deformace jednotlivých vidů, avšak

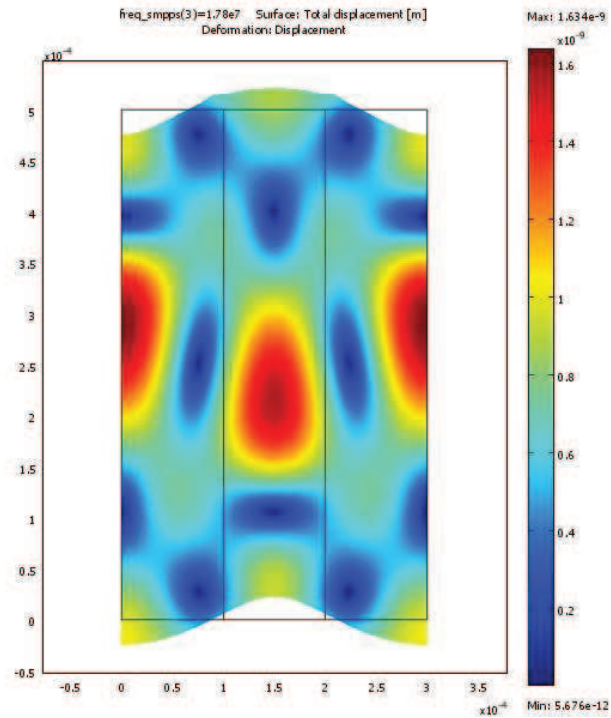
hodnoty mechanického namáhání se pohybují řádově v setinách až desítkách nanometrů.



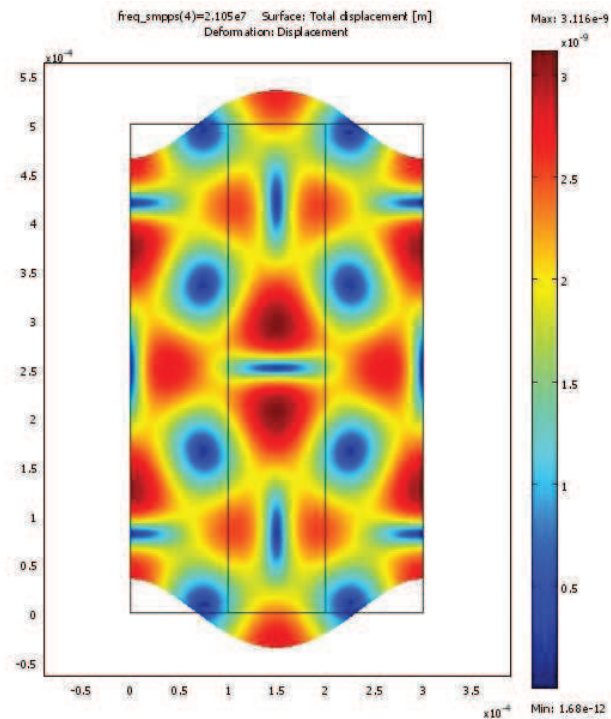
Obr. 2.5: Vid Lambovy vlny A0 na frekvenci 14,2 MHz.



Obr. 2.6: Vid Lambovy vlny S0 na frekvenci 14,5 MHz.



Obr. 2.7: Vid Lambovy vlny A1 na frekvenci 17,8 MHz.

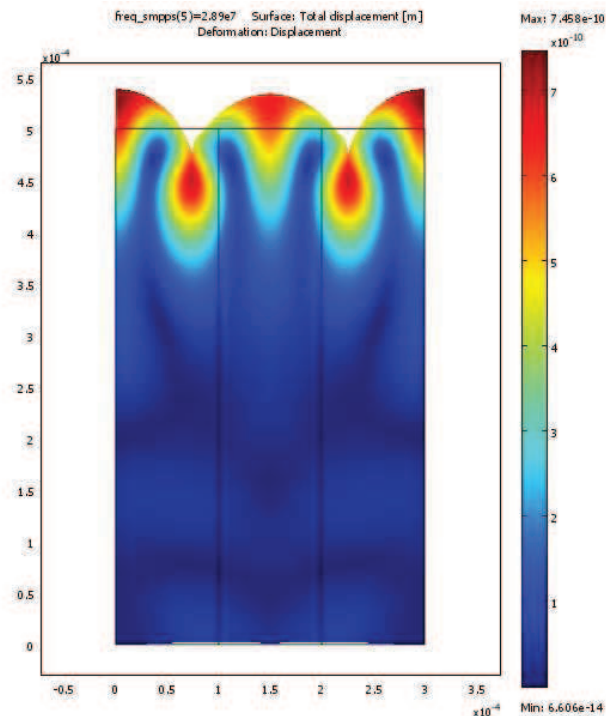


Obr. 2.8: Vid Lambovy vlny S1 na frekvenci 21,1 MHz.

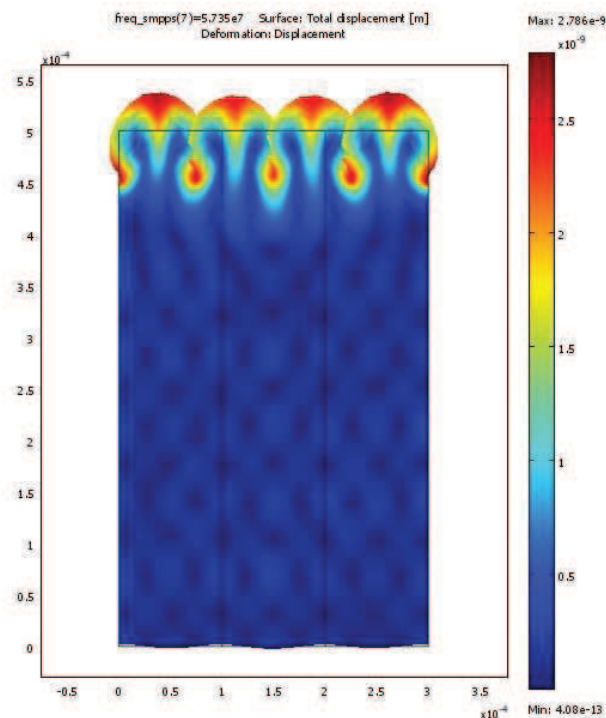
Na předešlých obrázcích jsou zachyceny vidy Lambovy vlny, jež jsou namodelovány podle článku [5]. Frekvence, na kterých se nacházejí, stejně jako rozložení mechanického namáhání a deformace, přibližně odpovídají výsledkům, které



měly být dosaženy. Označení uvedených vidů vyjadřuje to, zda jsou symetrické (S) nebo antisymetrické (A). Další dva grafy nezobrazují již vidy Lambovy vlny, nýbrž povrchové akustické vlny (viz. obr. 2.9, 2.10).

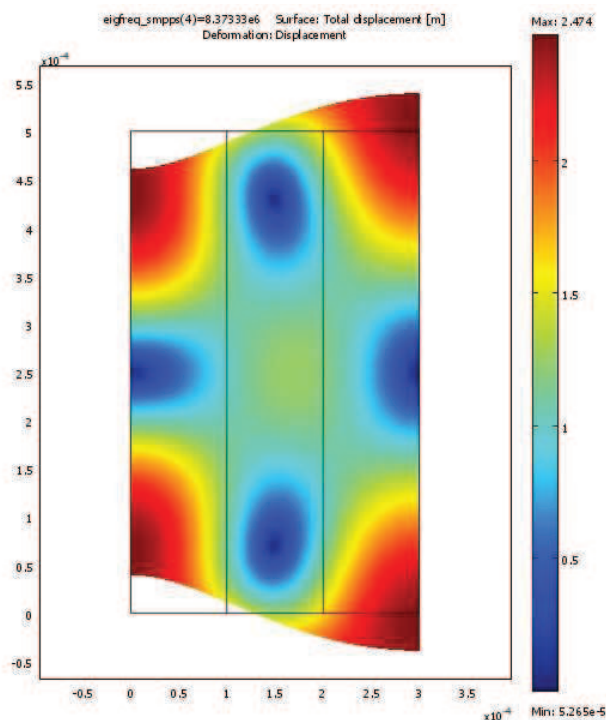


Obr. 2.9: Vid povrchové akustické vlny na frekvenci 28,9 MHz.



Obr. 2.10: Vid povrchové akustické vlny na frekvenci 57,4 MHz.

Na prvním z výše uvedených obrázků s příkladem povrchové akustické vlny je vlnová délka rovnající se polovině vzdálenosti středů dvou sousedních elektrodových prstů. Na dalším obrázku je zřetelně vidět, že vlnová délka povrchové vlny je čtvrtinou vzdálenosti středů elektrod. Oba grafy také ukazují míru deformace na povrchu dané struktury. Maximální hodnoty mechanického namáhání dosazují řádově nanometrů na obou dvou frekvencích. Posledním grafem je symetrický vid Lambovy vlny nalezený na rezonanční frekvenci přibližně 9 MHz s vlnovou délkou rovnající se dvojnásobku vzdálenosti středů elektrod, což je vidět na pravé vertikální straně struktury (obr. 2.11).



Obr. 2.11: Vid Lambovy vlny na frekvenci 8,4 MHz.

Tímto jsou nalezeny rezonanční frekvence pro tuto zjednodušenou strukturu, na niž lze vybudit některé vidy Lambovy vlny, a to jak symetrické, tak antisymetrické. Stejně tak byla vybudena akustická povrchová vlna. Výše uvedený postup je modelován podle článku [5].

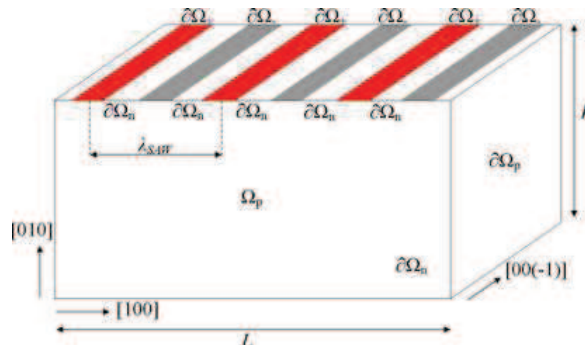
## 2.2 Elektrostrikce 2D

### 2.2.1 Úvod do řešení problému

V tomto případě má struktura o něco málo menší rozměry, a to  $12\ \mu\text{m}$  na výšku a  $12\ \mu\text{m}$  na šířku. Substrátem je piezokeramika (PZT-5H). Elektrické okrajové podmínky jsou takové, že na povrchu je umístěno šest elektrodových prstů, na kterých se střídá kladný a záporný potenciál (*Electric potential*). Zbylé stěny a mezery mezi elektrodami mají okrajovou podmínku s nulovým nábojem (*Zero charge / Symmetry*). Okrajové podmínky z hlediska mechaniky jsou takové, že spodní strana je fixní ve všech směrech (*Fixed*), levá a pravá fixní ve směru kolmém na ni a ostatním stěnám je ponechána



výchozí podmínka *Free*. Šířka každé elektrody a mezery mezi nimi je  $1\ \mu\text{m}$ . Zjednodušený náčrt modelu s piezoelektrickým substrátem je na obr. 2.12.

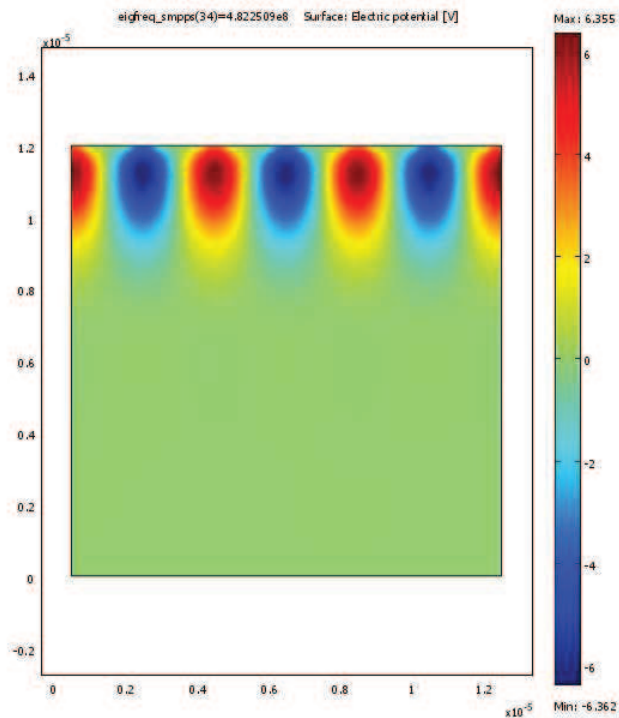


Obr. 2.12: Trojrozměrný model struktury se substrátem PZT-5H (převzato z [7]).

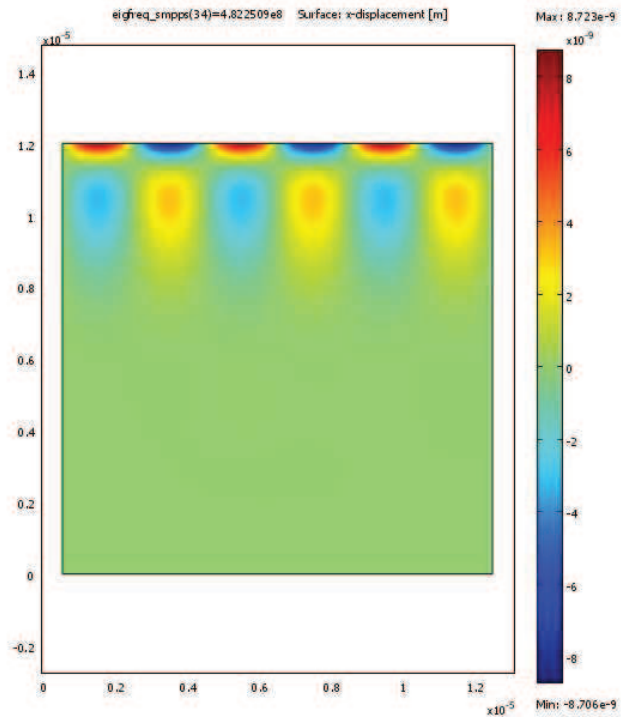
Zde  $\delta\Omega_+$  a  $\delta\Omega_-$  označují okrajové podmínky elektrického potenciálu,  $\delta\Omega_n$  a  $\delta\Omega_p$  okrajové podmínky pro stěny substrátu,  $\Omega_p$  je sub-doména,  $h$  je výška,  $L$  je délka substrátu a  $\lambda_{SAW}$  vlnová délka SAW vlny. Struktura uvedená výše byla opět modelována s jistým zjednodušením, a to pouze ve dvou rozměrech.

## 2.2.2 Modelování struktury

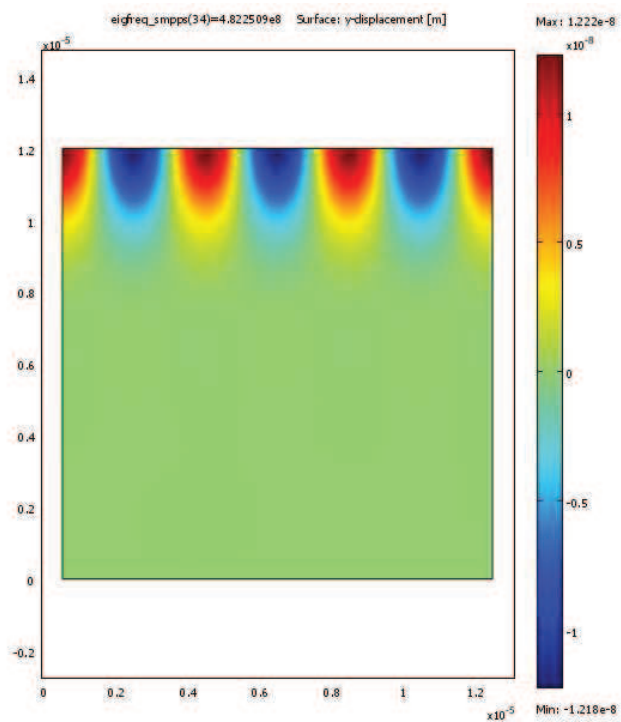
Modelování struktury se substrátem z piezoelektrické keramiky je podstatnou částí této práce a následující výsledky ukazují, jak se SAW vlny na povrchu materiálu chová.



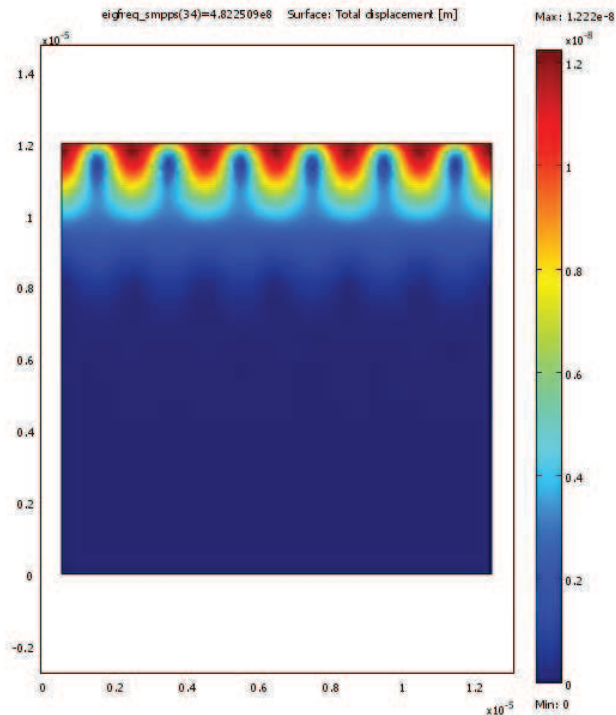
Obr. 2.13: 2D graf rozložení elektrického potenciálu v antirezanci na frekvenci 482,3 MHz (PZT-5H).



Obr. 2.14: 2D graf rozložení horizontálního mechanického namáhání na frekvenci 482,3 MHz (PZT-5H).

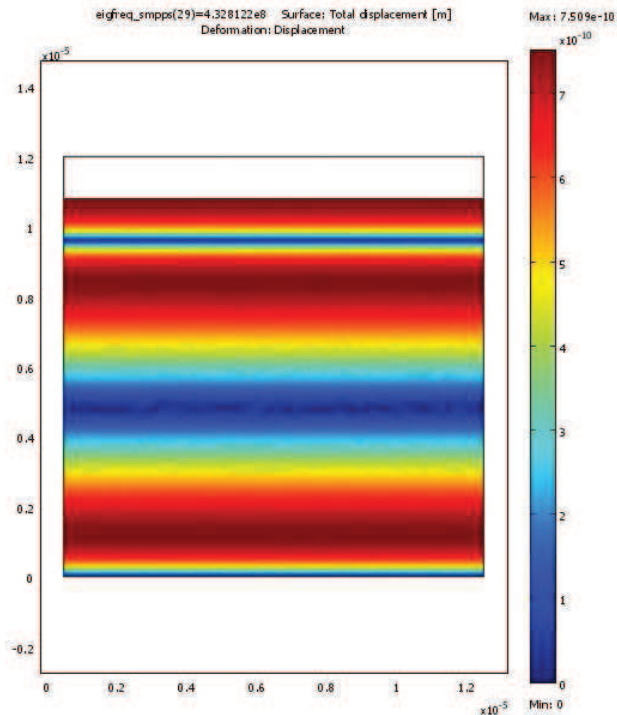


Obr. 2.15: 2D graf rozložení vertikálního mechanického namáhání na frekvenci 482,3 MHz (PZT-5H).



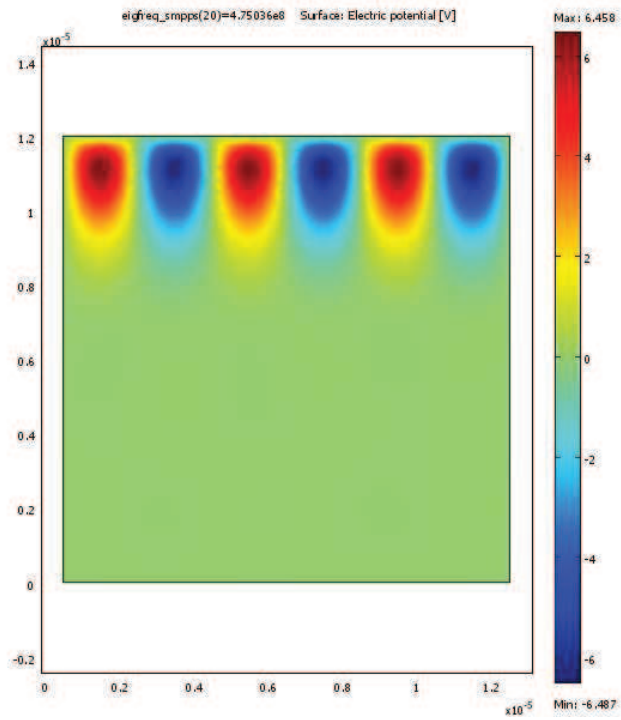
Obr. 2.16: 2D graf rozložení úplného mechanického namáhání v antirezonanci na frekvenci 482,3 MHz (PZT-5H).

V případě zjednodušené struktury bylo nutné při modelování použít periodické okrajové podmínky. Vzhledem k použitému modulu byly zavedeny tři parametry. Prvními dvěma parametry byla mechanická namáhání ve dvou na sebe kolmých směrech, které jsou v programu označovány jako  $u$  a  $v$ . Třetím parametrem byl elektrický potenciál označovaný  $V$ . Po proběhnutí výpočtu pak ze součtu mechanického namáhání v dílčích směrech vzniká graf rozložení celkového mechanického namáhání *Total displacement*, který je zobrazen na obr. 2.16. Dílčí rozložení mechanického namáhání ve dvou na sebe kolmých směrech lze vidět na obr. 2.14 a 2.15, kde je zřetelné, že maxima vertikálního směru se ztotožňují s umístěním potenciálu (obr. 2.13) a zároveň udávají, kde budou ležet maxima úplného mechanického namáhání. Akustická povrchová vlna v tomto případě náleží frekvenci přibližně 482,3 MHz a vlnová délka SAW vlny odpovídá vzdálenosti středů dvou sousedních elektrod se shodným potenciálem. Maximální hodnoty celkového mechanického namáhání dosahují hodnot jednotek mikrometrů. Výše uvedený postup je převzat z [7]. SAW vlnu lze nalézt pak také na nižší, resp. vyšší frekvenci, a to např. na frekvenci 318,1 MHz je SAW vlna s vlnovou délkou rovnou třem polovinám vzdálenosti středů sousedních elektrod a na frekvenci 398 MHz, kdy vlnová délka leží třech polovin a jedné. Maxima těchto vln zůstávají řádově podobná jako v případě frekvence 482,3 MHz, avšak čím vyšší frekvence, tím je hloubka mechanického projevu méně intenzivní. Mezi těmito frekvencemi se pak objevují vidy prostorových vln Lambovy a vlny Bulk, které jsou pro toto řešení nežádoucí. Příklad Lambovy prostorové vlny byl již prezentován v několika podobách na předchozím modelu s meandrovým vedením. Příklad prostorové vlny Bulk, je zde na obr. 2.17, na frekvenci 432,8 MHz.

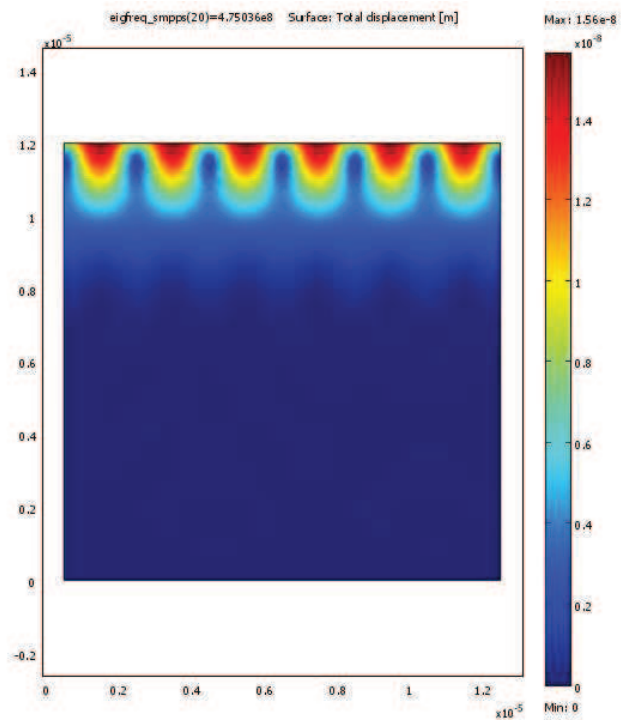


Obr. 2.17: Vid prostorové vlny Bulk na frekvenci 432,8 MHz.

V rámci této podkapitoly je třeba ještě poukázat na možnost, že mohou nastat vždy dva případy vybuzení SAW vlny, a to případ, kdy je v rezonanci nebo v antirezonanci. Oba jevy si obvykle bývají frekvenčně velmi blízko, avšak v tomto případě jsou od sebe vzdáleny až o 8 MHz. Antirezonance byla již vyobrazena výše. Na obr. 2.18 a 2.19 je vidět rozložení celkového mechanického namáhání a odpovídajícího elektrického potenciálu, přičemž v místech, kde jsou maxima elektrického potenciálu, jsou taktéž maxima mechanického pnutí. Následující grafy tedy zachycují jev rezonance na frekvenci 475 MHz. Při tomto jevu se maxima elektrického potenciálu nachází v oblasti kolem elektrod a pod nimi, kdežto při antirezonanci vyplňují mezery mezi nimi. Oba případy jsou proti sobě posunuty o čtvrtinu vlnové délky, avšak fázová rychlost nebo mechanické pnutí je téměř beze změny.



Obr. 2.18: 2D graf rozložení elektrického potenciálu v rezonanci na frekvenci 475 MHz (PZT-5H).

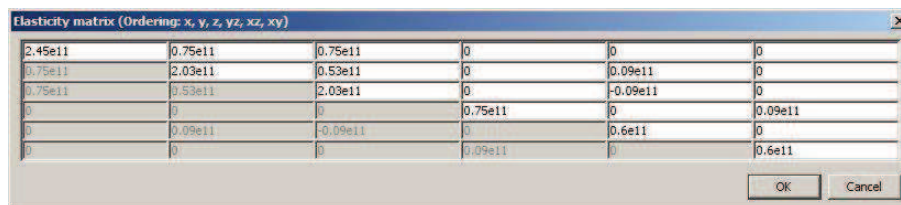


Obr. 2.19: 2D graf rozložení úplného mechanického namáhání v rezonanci na frekvenci 475 MHz (PZT-5H).

## 2.3 Elektrostrikce 3D

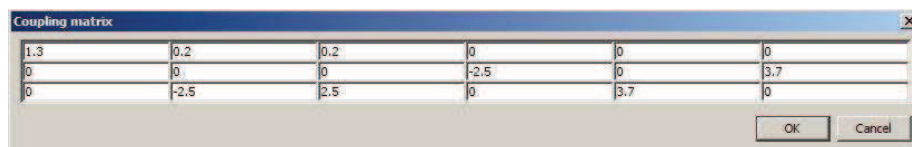
### 2.3.1 Úvod do řešení problému

Výše uvedené problémy jsou v této fázi práce převedeny ze dvou do tří rozměrů. Podle článku [8] je vytvořen trojrozměrný model, který je založen na piezoelektrickém substrátu niobičnanu lithném, na němž jsou umístěny dvě hliníkové elektrody. Pro tento případ není substrát zvolen z knihovny programu, ale jeho čtyři základní konstantní parametry jsou vypsány z článku, kde jsou mírně zaokrouhleny. Tři z těchto parametrů (obr. 2.20, 2.21 a 2.22) jsou sepsány v maticích a čtvrtým parametrem je hustota  $\rho$  daného materiálu, která je  $4650 \text{ kg.m}^{-3}$ . Materiál elektrod je volen jako izotopický a odpovídá parametrům hliníku, přičemž Youngův modul  $E$  je 70 GPa, Poissonovo číslo  $\nu$  je 0,35 a hustota  $2700 \text{ kg.m}^{-3}$ .



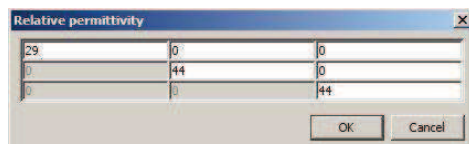
2.45e11	0.75e11	0.75e11	0	0	0
0.75e11	2.03e11	0.53e11	0	0	0.09e11
0.75e11	0.53e11	2.03e11	0	-0.09e11	0
0	0	0	0.75e11	0	0.09e11
0	0.09e11	-0.09e11	0	0	0.6e11
0	0	0	0.09e11	0	0.6e11

Obr. 2.20: Matice konstanty pružnosti niobičnanu lithného.



1.3	0.2	0.2	0	0	0
0	0	0	-2.5	0	3.7
0	-2.5	2.5	0	3.7	0

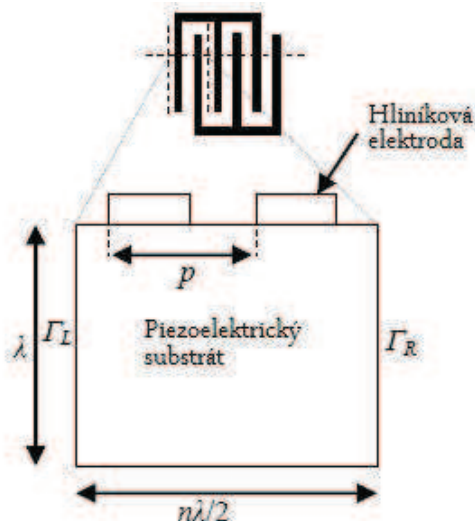
Obr. 2.21: Matice vazební konstanty niobičnanu lithného.



29	0	0
0	44	0
0	0	44

Obr. 2.22: Matice relativní permitivity niobičnanu lithného.

Dále pak okrajové podmínky z hlediska mechaniky jsou takové, že levá a pravá stěna má přízvisko *Roller*, podstava nemá povolen posun v žádném směru, a tedy *Fixed* a všem ostatním plochám je ponechána původní mechanická podmínka *Free*. Elektrické okrajové podmínky jsou v podstatě shodné s podmínkami v předchozím dvourozměrném modelu. Plochy, kde se dotýkají elektrody se substrátem, mají navzájem opačný elektrický potenciál, ostatní pak mají nulový náboj. Zjednodušený náčrt modelované struktury je na obr. 2.23.

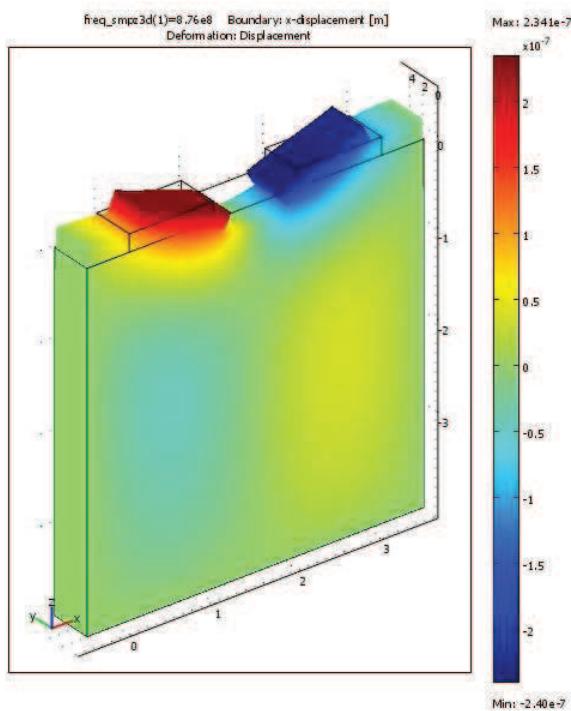


Obr. 2.23: Zjednodušený model 3D struktury (převzato z [8]).

Na výše uvedeném obrázku je  $p$  vzdálenost středů sousedních elektrod,  $\lambda$  vlnová délka, pomocí  $n$  je počet úseků  $p$  a  $\Gamma$  jsou plochy levé a pravé stěny. Na elektrodách je umístěn elektrický potenciál 10 V a -10 V.

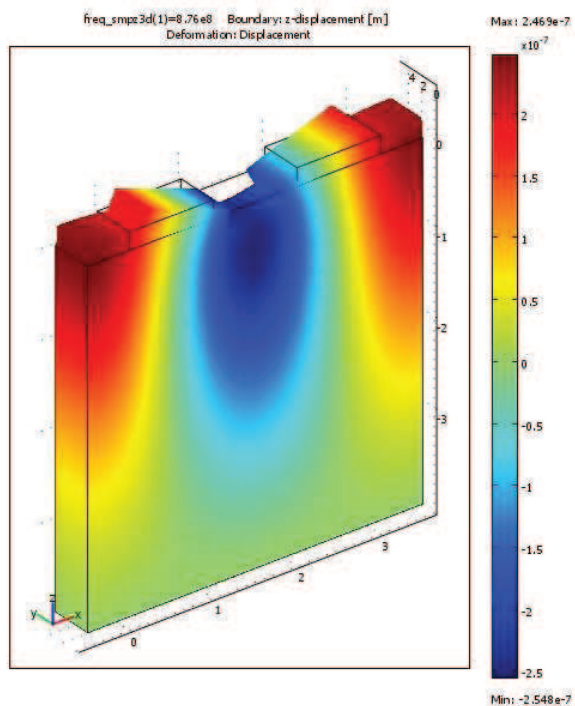
### 2.3.2 Modelování struktury

Dosažené výsledky přibližně odpovídají předloze [8] a jsou prezentovány na níže uvedených grafech rozložení mechanického namáhání (obr. 2.24, 2.25 a 2.26).

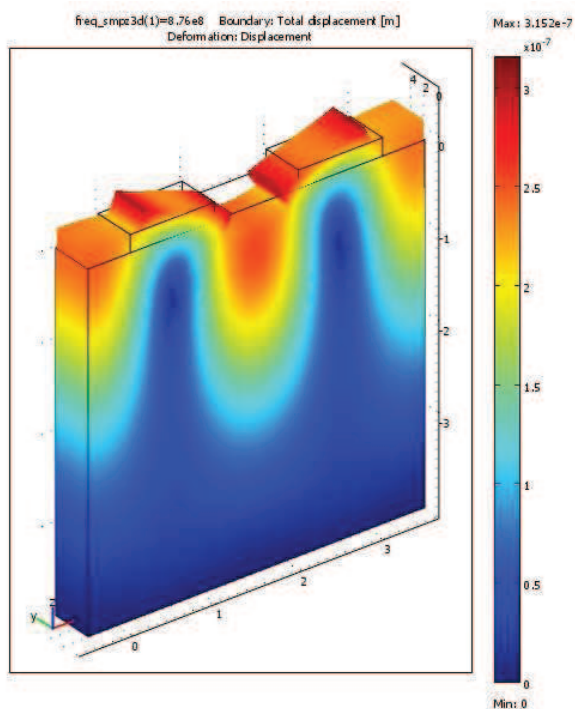


Obr. 2.24: 3D graf rozložení horizontálního mechanického namáhání na frekvenci 876 MHz (niobičnan lithný).





Obr. 2.25: 3D graf rozložení vertikálního mechanického namáhání na frekvenci 876 MHz (niobičnan lithný).

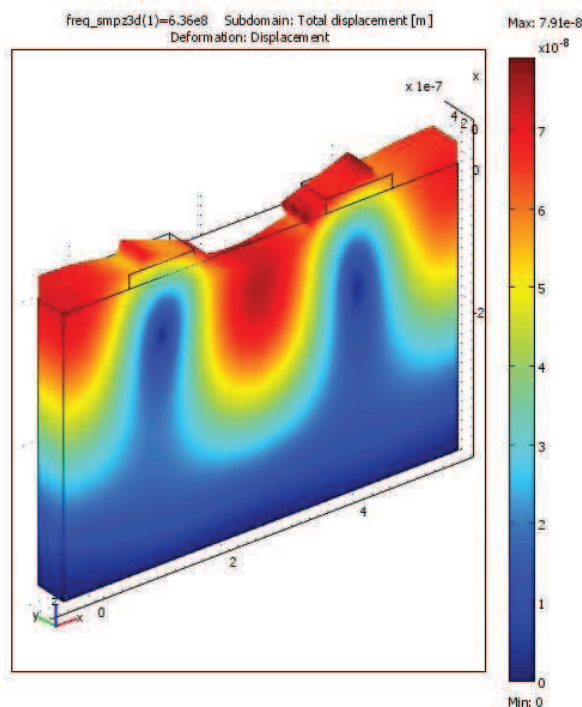


Obr. 2.26: 3D graf rozložení úplného mechanického namáhání na frekvenci 876 MHz (niobičnan lithný).

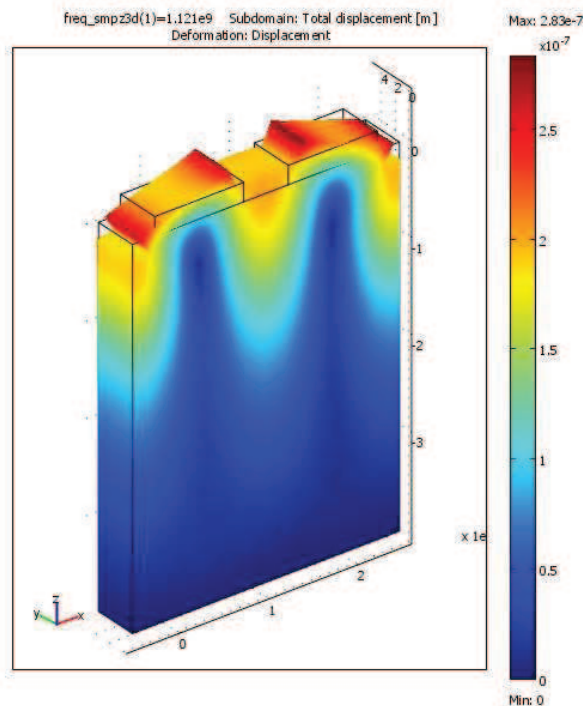
Pro tuto strukturu je možné zobrazit mechanické namáhání dokonce ve třech směrech, avšak pro tento případ postačí zobrazení ve směrech nejdelších stran. Je zde



opět vidět, že amplitudy mechanického namáhání ve vertikálním směru (obr. 2.25) udávají, kde budou ležet maxima *Total displacement* (obr. 2.26). Maximální hodnoty, kterých je během tohoto jevu dosaženo, jsou řádově jednotky nanometrů. Vlnové délce v tomto případě odpovídá míra deformace na povrchu substrátu, kde jsou vcelku jasně zřetelná maxima. Vlnová délka tedy opět odpovídá vzdálenosti středů dvou sousedních elektrod se shodným potenciálem. Tato vlnová délka s hodnotou 4  $\mu\text{m}$  koresponduje s délkou řezu substrátem. Druhým důležitým údajem povrchové akustické vlny je frekvence 876 MHz. Je možné také vypočítat rychlost Rayleighovy vlny, jelikož je známa její vlnová délka i frekvence. Rychlost je možné spočítat v programu přes menu *Postprocessing / Data Display / Global Data Display*, kde se do řádku *Expression* vepíše daný vzorec. Při potvrzení se na stavovém řádku vypíše požadovaná hodnota, která je v tomto případě  $3504 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . U tohoto modelu byl také pozorován vliv změn některých parametrů na základní vlastnosti SAW vlny, které jsou zobrazeny a popsány níže.



Obr. 2.27: 3D graf rozložení úplného mechanického namáhání při dvojnásobné mezeře mezi elektrodami na frekvenci 636 MHz (niobičnan lithný).



Obr. 2.28: 3D graf rozložení úplného mechanického namáhání při poloviční mezeře mezi elektrodami na frekvenci 1121 MHz (niobičnan lithný).

Nejprve byly provedeny změny všech tří rozměrů substrátu, které zaznamenaly jen zanedbatelný rozdíl u hodnot mechanického namáhání, avšak na vlnovou délku nebo frekvenci žádný vliv neměly. Při zdvojnásobení vzájemné vzdálenosti elektrod na povrchu substrátu byla SAW vlna s vlnovou délkou rovnou vzdálenosti dvou sousedních elektrod se shodným potenciálem nalezena na nižší frekvenci, a to 636 MHz (obr. 2.27). Změna frekvence s sebou nesla nárůst fázové rychlosti vlny na  $3816 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . V opačném případě (obr. 2.28), když je tato mezera zmenšena na polovinu, pak frekvence vzroste na 1121 MHz a rychlost klesne na  $3363 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Při zmenšení mezery pak také vzroste řádově asi desetkrát hodnota *Total Displacement*. Závislost hodnoty Total Displacement na elektrickém potenciálu se projevila přímo-úměrným stoupáním nebo klesáním, přičemž při desetinásobném zvětšení, resp. zmenšení elektrického potenciálu vzrostla, resp. klesla také desetinásobně hodnota *Total Displacement*. Na závěr je ještě uvedena tabulka rychlostí a frekvencí pro stále stejnou vlnovou délku v závislosti na zvoleném materiálu dielektrického podkladu vybraného z knihovny programu (tab. 2.1). Rychlosti vlny v této tabulce se pohybují v jednotkách  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ , což odpovídá teoretickému předpokladu uvedenému např. v literatuře [9]. Z vybraných piezoelektrických materiálů je akustická povrchová vlna nejpomalejší na povrchu piezoelektrické keramiky PZT-5H, což je podmíněno vlastnostmi daného materiálu, a to především vysokých hodnot v matici relativní permitivity. Díky této skutečnosti je také hledaná povrchová vlna nalezena na mnohem nižší frekvenci než u ostatních materiálů. Piezokeramika byla zvolena v této práci jako substrát pro dvourozměrné modelování pro druhý příklad a na závěr práce je pak také podrobena optimalizaci.

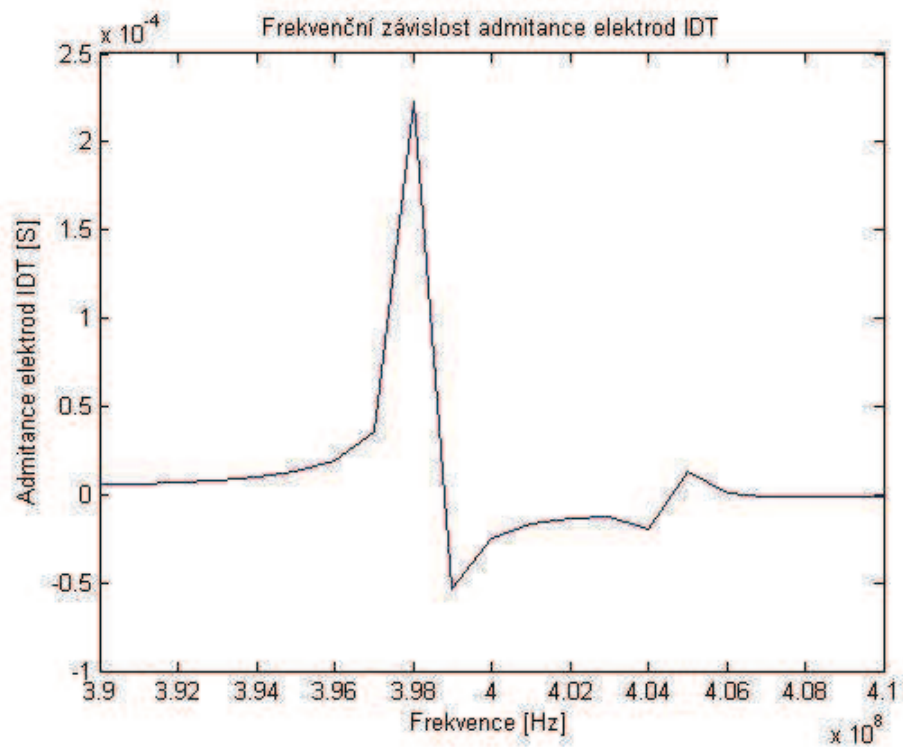
Tab. 2.1: Tabulka hodnot rychlostí a frekvence vlny pro několik druhů substrátů.

Název substrátu	Rychlost vlny	Frekvence
	[m.s <sup>-1</sup> ]	[MHz]
Niobičnan lithný	3795,6	939,9
PZT-5H	1854,4	463,6
Křemen	3435,6	858,9
Tantaličnan lithný	3252,0	813,0

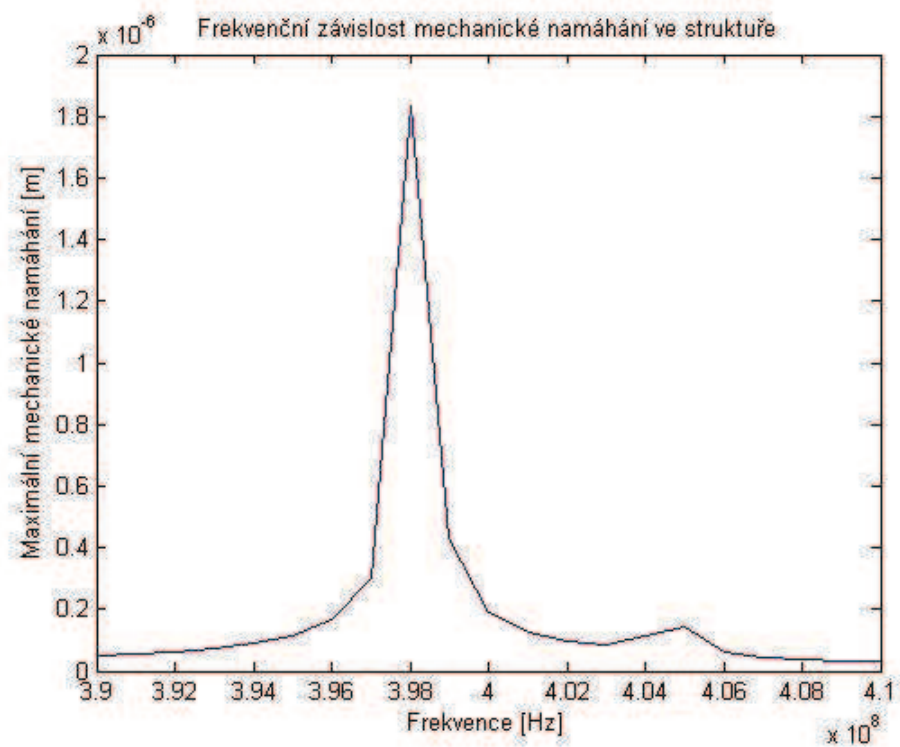
## 2.4 Optimalizace PSO algoritmem

### 2.4.1 Úvod do řešení problému

V závěrečné části této práce byl vybrán jeden z předchozích modelů zařízení s povrchovou akustickou vlnou a byl podroben globální optimalizační rutině PSO algoritmem. Pro tyto účely je využita spolupráce programů Comsol Multiphysics a MATLAB. Nejprve je celá struktura jednoduše namodelována v grafickém rozhraní programu Comsol Multiphysics, dále uložena jako *m-file* a vyvolána jako funkce v programu MATLAB. Vzhledem k výpočetní náročnosti musela být zvolena jednoduchá dvojrozměrná struktura, čemuž odpovídal model s piezokeramickým substrátem. Pomocí parametrické analýzy byla získána frekvenční závislost admitance elektrodoých prstů, jejíž průběh je na obr. 2.29 v rozsahu frekvencí 390 MHz až 410 MHz a s frekvenčním krokem 1 MHz. Na obr. 2.30 je vykreslena závislost maximálního mechanického namáhání ve struktuře. Ve srovnání s průběhem admitance je zřetelná spojitost, kdy na rezonančních frekvencích s povrchovou vlnou je zároveň největší maximální mechanické namáhání struktury. Toto maximální mechanické namáhání dosahuje až hodnoty 1,9  $\mu\text{m}$  na frekvenci 398 MHz, která odpovídá místu rezonance a vzniku povrchové vlny. Na frekvencích, kde je vybudena právě povrchová vlna, dochází k největší kumulaci maximálního mechanického pnutí, neboť veškerá energie se soustředí jen při povrchu substrátu. U prostorových vln, jako je Lambova nebo Bulk vlna, je energie rozložena téměř po celém substrátu a admitance nedosahuje ani řádově takových hodnot jako při vzniku povrchové vlny. Na obr. 2.29 a 2.30 je to zřetelně vidět v grafech, kdy se na frekvenci okolo 405 MHz objevuje právě admitanční maximum pro Lambovu vlnu. Je třeba dodat, že Lambova vlna vzniká ve struktuře velmi často, na rozdíl od povrchové vlny a Bulk vlny, které jsou spíše zvláštními případy.



Obr. 2.29: Výchozí frekvenční závislost admittance.



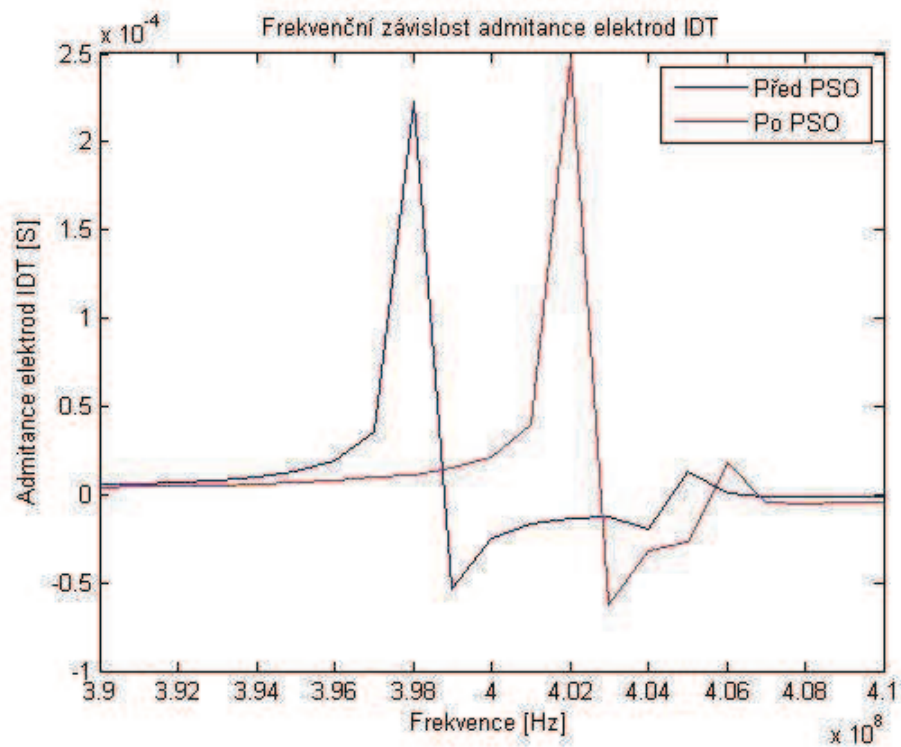
Obr. 2.30: Výchozí frekvenční závislost maximální mechanické namáhání ve struktuře.

## 2.4.2 Výsledky optimalizace

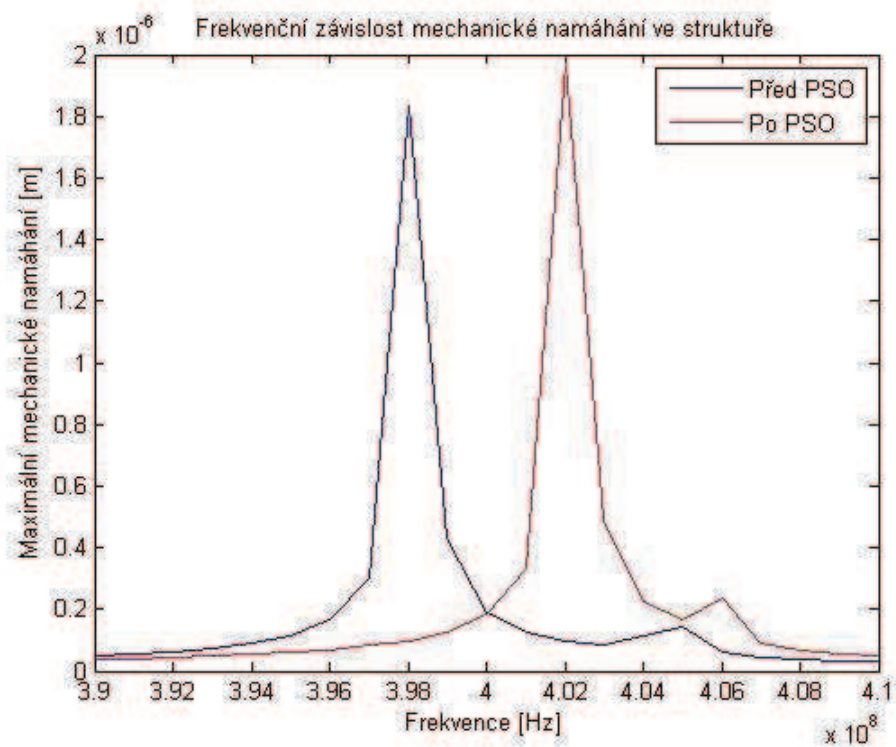
V další fázi práce proběhla optimalizace admitanční charakteristiky. Materiály v piezoelektrickém modulu mají matici relativní permitivity symetrickou podle hlavní diagonály a konkrétně piezoelektrické materiály mají na všech pozicích v matici, kromě hlavní diagonály, nuly. Tímto je ušetřen výpočetní výkon optimalizace, neboť vstupní proměnné jsou pouze tři, avšak dosahují vysokých hodnot, a tak je třeba je vhodně vymezit, aby bylo nalezeno požadované řešení. Podmínkou maximální hodnoty vstupních proměnných byla zvolena hodnota 2000, což se jevilo vzhledem k materiálům, které jsou obsaženy v knihovně programu jako nejvhodnější. Z admitanční charakteristiky byly vybrány tři body, na kterých bude výpočet optimalizace probíhat. Jako stěžejní bod je brána admitance na frekvenci 398 MHz a při optimalizaci bude hledáno řešení, kdy se tento bod promítne zrcadlově kolem frekvence 400MHz na frekvenci 402 MHz, aby byla vidět praktičnost a použitelnost využití optimalizace při řešení této problematiky. Samotný výpočet optimalizace proběhl několikrát, poněvadž ne všechny výsledky konvergovaly ke správnému řešení. Na obr. 2.31, 2.33, 2.35 jsou prezentovány výsledky, ke kterým řešení konvergovalo dokonce několikrát, čímž byla neustále potvrzována jejich správnost. Na obr. 2.32, 2.34, 2.36 jsou pak grafy korespondujícího maximálního mechanického namáhání, pro které musel být vytvořen jednoduchý pomocný skript v MATLABu (uveden v elektronické verzi), poněvadž v programu Comsol Multiphysics nebyla funkce nalezena. A konečně na obr. 2.37 graf chybové funkce v logaritmickém měřítku v závislosti na počtu iteračních kroků. Vyobrazený graf chybové funkce je uveden, aby bylo vidět, jak jednotlivá řešení konvergovala. V každém případě vždy došlo hned v prvním kroku ke značnému poklesu chybové funkce o několik řádů. S přibývajícemi iteracemi se řešení čím dál více blížilo nulové hodnotě, které však nemusí nikdy dosáhnout, pokud toto přesné optimum neexistuje vzhledem k podmínkám optimalizace. V několika případech dokonce optimalizace našla své optimum právě hned v prvním kroku, avšak nebylo to ono globální optimum. Chybová funkce klesla na určitou hodnotu již při prvním kroku a na této hodnotě se ustálila. Tab. 2.2 obsahuje hodnoty matice relativních permitivit pro výchozí strukturu a pro tři různá řešení struktury optimalizované.

Tab. 2.2: Tabulka hodnot relativních permitivit výchozí a optimalizované struktury.

Označení		Hodnoty relativních permitivit		
		$\epsilon_{11}$	$\epsilon_{22}$	$\epsilon_{33}$
Před PSO		1704,4	1704,4	1433,6
Po PSO	A	1471,1	812,0	1453,0
	B	1600,9	1734,7	1170,4
	C	1782,8	1325,1	800,5

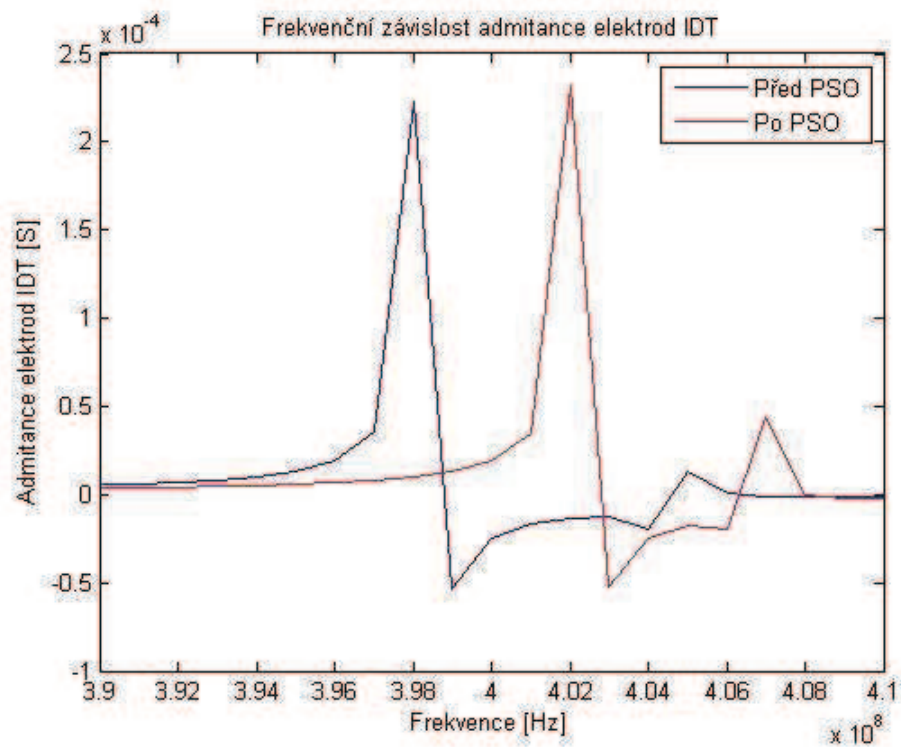


Obr. 2.31: Optimalizovaná frekvencní závislost admittance pro 10 iterací a 100 jedinců (A).

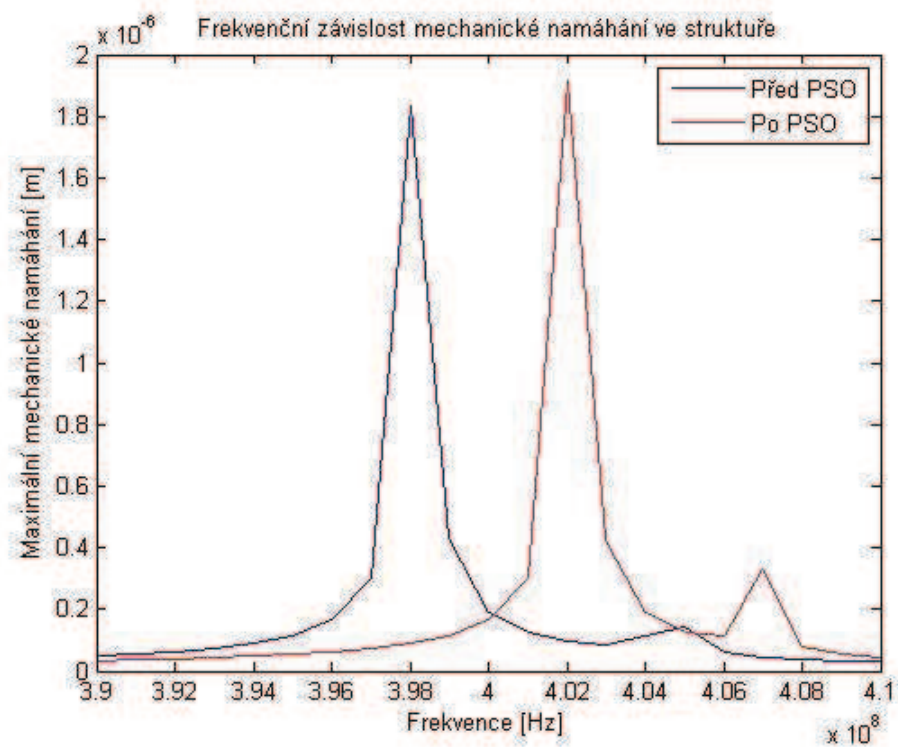


Obr. 2.32: Optimalizovaná frekvencní závislost maximálního mechanického namáhání ve struktuře (A).

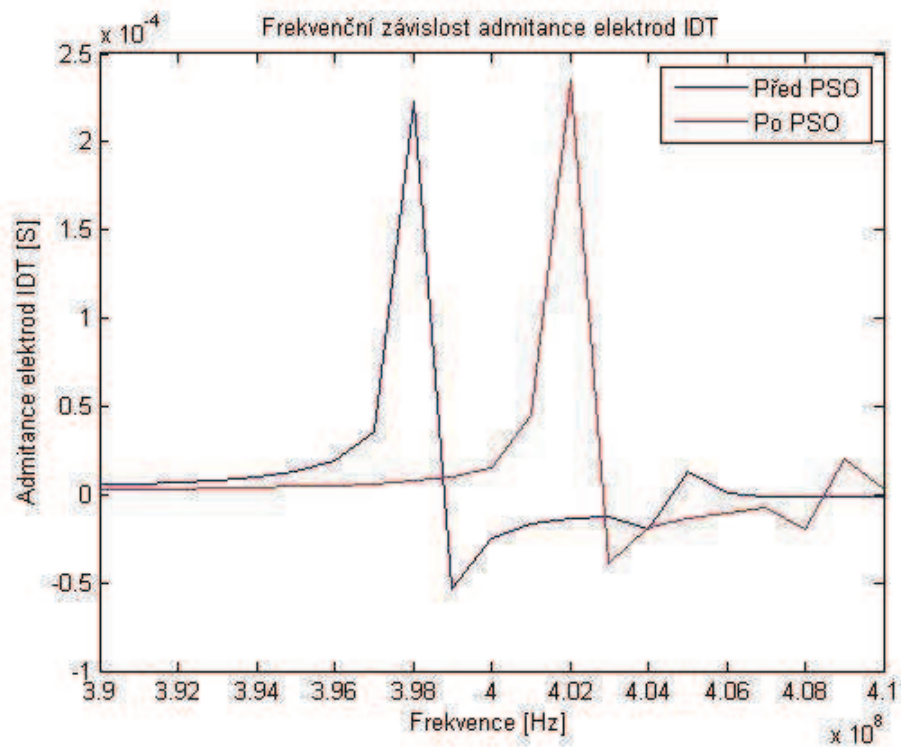




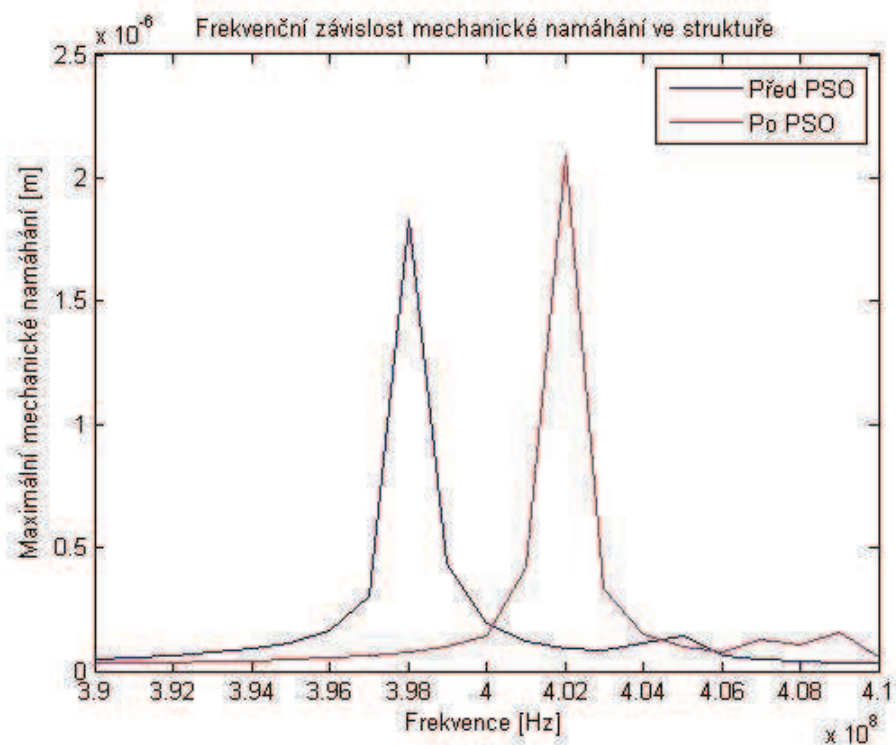
Obr. 2.33: Optimalizovaná frekvencní závislost admittance pro 10 iterací a 100 jedinců (B).



Obr. 2.34: Optimalizovaná frekvencní závislost maximálního mechanického namáhání ve struktuře (B).

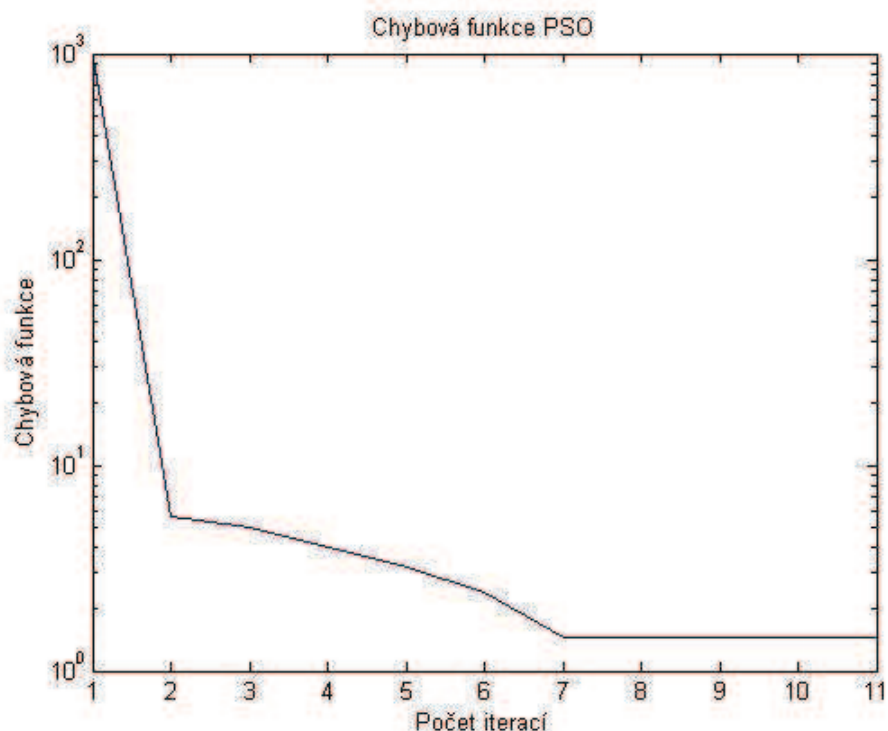


Obr. 2.35: Optimalizovaná frekvencní závislost admitance pro 10 iterací a 100 jedinců (C).



Obr. 2.36: Optimalizovaná frekvencní závislost maximálního mechanického namáhání ve struktuře (C).





Obr. 2.37: Chybová funkce PSO pro 10 iterací a 100 jedinců.

Na výše uvedených frekvenčních závislostech je zřetelně vidět, že optimalizace konvergovala, což ukazuje i graf chybové funkce, který z hodnoty  $10^3$  klesá k velmi nízkým hodnotám. V této části práce je třeba poznamenat, že v piezoelektrickém modulu programu Comsol Multiphysics nelze na těchto jednoduchých modelech simulovat přenosovou funkci, ale pouze buzení povrchové vlny pomocí magnetostrikce nebo elektrostrikce. Vzhledem k tomu lze ovšem pomocí programové funkce integrace vypočítat plošnou hustotu proudu na elektrodách a při znalosti napětí na elektrodách získat hodnoty admitance. Tato byla vynesena do grafu a namísto přenosové charakteristiky optimalizována. Provedeno bylo několik optimalizačních cyklů, a to nejprve pro malé množství jedinců a iterací, které ovšem nenašly vhodné řešení. Délka trvání cyklu pro 30 iterací a 20 jedinců bylo téměř tři hodiny. Při změně postupu byl zvýšen počet jedinců v hejnu na 100, což se zdálo být vhodnější. Počet iteračních kroků v tomto případě musel klesnout, aby celý cyklus netrval příliš dlouho. Pro 10 iterací a 100 jedinců trval děj asi čtyři hodiny. Při hledání optima admitanční charakteristiky byly zvoleny tři hodnoty admitance, avšak pro zkrácení doby výpočtů by bylo možné zvolit i pouze dva body. V grafech uvedených výše jsou vidět dosažené nejpřesnější výsledky, přičemž nejvhodněji se jevil obr. 2.35. V případě, že řešení divergovalo a nenašlo řešení, vyšel vrchol admitanční charakteristiky i na jiné frekvenci než byla požadována. Pro výpočet ztrát šířením povrchové vlny by se dal využít akustický modul, který také obsahuje program Comsol Multiphysics, avšak ústav radioelektroniky jej nemá k dispozici. Bylo by také možné simulovat komplexnější trojrozměrný model, který by obsahoval vstupní i výstupní elektrody, přičemž by mezi ně bylo vloženo ztrátové prostředí pohlcující akustickou vlnu. Tento model by však nebyl vzhledem k výpočetní náročnosti příliš vhodný pro optimalizaci, jelikož už pro jednoduchý dvojrozměrný model trval optimalizační cyklus přibližně čtyři hodiny pro 10 iterací

a 100 jedinců. Při dvojnásobném počtu iterací byla i dvojnásobná délka výpočtu. Co se týče hodnot admitance, tyto řádově odpovídají hodnotám admitance, které byly prezentovány v člancích konferencí Comsol. Přesné hodnoty v tomto případě jsou kompromisem mezi frekvenčním krokem parametrických analýz a časovou náročností veškerých výpočtů. Zdrojový kód hlavní funkce algoritmu PSO je uveden v příloze i s komentářem. Ostatní zdrojové kódy použité v této práci obsahuje elektronická verze.

Na závěr bude ještě provedena ruční optimalizace vztažena ke kvalitě sítě při použití metody konečných prvků pro vybraný vid jednoduché struktury. Tuto strukturu již není třeba prezentovat graficky, neboť podstatné budou pouze hodnoty, které budou uvedeny v tab. 2.3. Pro tento případ bude tedy vzata část modelu, jehož materiálem je piezokeramika. Rozměrově bude ovšem třetinová se dvěma elektrodami na jejím povrchu. Jsou uvažovány všechny možné předdefinované stupně kvality sítě konečných trojúhelníkových prvků. Můžou nastat dva případy pro povrchovou vlnu, a to když je v rezonanci nebo v antirezonanci.

Tab. 2.3: Tabulka hodnot frekvence a fázové rychlost vzhledem ke kvalitě sítě konečných prvků.

Počet konečných prvků	Rezonance		Antirezonance	
	Frekvence	Rychlost	Frekvence	Rychlost
[-]	[MHz]	[m.s <sup>-1</sup> ]	[MHz]	[m.s <sup>-1</sup> ]
41	487,8746	1951,4980	494,6506	1978,6024
71	479,9249	1919,7000	486,4322	1945,7288
127	475,7577	1903,0310	482,9697	1931,8788
178	475,3392	1901,3570	482,6262	1930,5048
339	474,9739	1899,8960	482,2775	1929,1100
487	474,9340	1899,7360	482,1321	1928,5284
1072	474,8145	1899,2580	482,2490	1928,9960
3597	474,8165	1899,2660	482,4001	1929,6004
14387	474,8748	1899,4990	482,6568	1930,6272

Předchozí tabulka naznačuje, jak s rostoucím počtem konečných prvků dochází ke zpřesňování výsledků, klesá hodnota frekvence a spolu s ní i fázová rychlost vlny. Rychlost vlny se liší o přibližně 50 m.s<sup>-1</sup> mezi nejhorší kvalitou a kvalitou nastavenou programem jako výchozí, v tabulce s počtem konečných prvků 339. Relativní chyba, o kterou se liší vykreslení s nepřesnou sítí prvků, je až 2,5 %. U složitějších struktur, kde je třeba ušetřit čas na úkor kvality, je důležité tyto skutečnosti zohlednit. Zjemnění sítě se projeví už jen málo a uplatnilo by se více na jiných typech struktury.

## 2.5 Komerčně vyráběné součástky

Poslední část této práce se zabývá parametry komerčně vyráběných součástek s akustickou povrchovou vlnou, a to nejenom filtrů. Výsledky, které byly dosaženy, pro hodnoty admitance v simulacích jednotlivých modelů, vždy řádově odpovídaly článkům z konferencí Comsol. Hodnoty admitance se pohybovaly v oblasti desítek až stovek  $\mu\text{S}$ ,

což jsou přibližně  $k\Omega$  v impedanční škále. Vzhledem k tomu, že nebylo možno namodelovat přenosovou charakteristiku, a tím spíše jí optimalizovat, není tedy ani možné porovnat její strmost s hodnotami součástek komerčně vyráběných. Veškeré výsledky simulací provedené v této práci zahrnují jednoduchou strukturu, která zobrazuje pouze jev elektrostriktce, a tedy vybuzení akustické vlny na povrchu substrátu.

U reálných součástek bývá uvedena pouze hodnota přizpůsobené vstupní a výstupní impedance, která je pro mikrovlnné integrované obvody nevhodněji  $50\ \Omega$  na celém rozsahu pracovních frekvencí, avšak u filtru DW9255 pro GPS [18], který funguje na frekvenci okolo 35 MHz, byla impedance vyšší, a to vstupní  $500\ \Omega$  a výstupní  $1\ k\Omega$ . Informaci o impedanci nebo admitanci prstů interdigitálního měniče katalogové listy neobsahují. Při aplikování modelované struktury do praxe by tedy bylo nutné provést samozřejmé přizpůsobení, jelikož namodelovaná struktura má na frekvencích stovek MHz impedanci řádově v  $k\Omega$ . Parametry, které jsou pro filtr a akustickou vlnou podstatné jsou také budící napětí, která mohou být buďto střídavá nebo stejnosměrná. Stejnosměrná budící napětí dosahují hodnoty až 10 V a mezivrcholová hodnota střídavého napětí také. Dále pak vzhledem k šířce pásma propustnosti reálných filtrů je třeba přihlídnout k tomu, že dokážou být relativně úzkopásmové, přičemž např. nízko-ztrátový SAW filtr firmy EPCOS model B3550 má v okolí pásma propustnosti útlum 15 dB na nižších frekvencích a 20 dB na vyšších frekvencích, dále pak už roste útlum až na 50 dB a více [17]. Co se týče šířky pásma, která se v tomto případě pohybuje okolo 1 až 2 MHz, by se dalo při dalším pokračování této práce v budoucnu zaměřit na souvislost mezi frekvenční závislostí admitance a přenosu. Tyto náležitosti by bylo vhodné provázat se závislostí maximálního mechanického pnutí ve struktuře. Jelikož byla zjištěna skutečnost, že akustická povrchová vlna může existovat jen na některých frekvenčních rozsazích, pak by toto mohlo úzce souviset právě s přenosem. Pásmo propustnosti by teoreticky mohlo být na frekvencích, kde se šíří povrchová vlna, a kde je zároveň velmi silné mechanické pnutí jen a pouze na povrchu substrátu. Mechanické pnutí pak při piezoelektrickém jevu znovu stejně intenzivně vybudí elektrické pole na výstupním interdigitálním měniči. Dále jsou uvedeny maximální a minimální teploty, na kterých je zařízení schopno regulérně pracovat, a to např. opět pro model B3550 jsou to rozsahy teplot od  $-45\ ^\circ\text{C}$  do  $120\ ^\circ\text{C}$ . Toto by mohlo být dalším předmětem zkoumání při navázání na tuto práci, a tedy do jaké míry teplota ovlivní danou strukturu a na jaké parametry mohou mít největší vliv její extrémní.

### 3 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá problematikou filtru s akustickou povrchovou vlnou. Teoretická část se věnuje základním principům, způsobům použití a aplikacím SAW v oblasti zpracování signálu. Výpočty jsou prováděny programem Comsol Multiphysics metodou konečných prvků a optimalizace v uživatelském prostředí MATLAB pomocí algoritmu PSO. Principy obou těchto metod jsou zde objasněny.

V praktické části jsou v programu Comsol Multiphysics namodelovány tři různé zjednodušené modely filtru SAW. Dva z těchto modelů jsou pouze dvourozměrné, přičemž první z nich je založen na využití magnetostrikce a je umístěn na křemíkovém substrátu. U tohoto modelu jsou na příslušných rezonančních frekvencích nalezeny jednotlivé vidy SAW vlny, ale také nežádoucí vidy prostorové vlny Lambovy nebo vlny Bulk. Druhý model již využívají k přeměně elektrické energie na mechanickou inverzního piezoelektrického jevu, neboli elektrostrikce, a substrátem v tomto případě je piezoelektrická keramika. Pro tuto strukturu bylo zobrazeno rozložení budícího elektrického potenciálu a následného mechanického namáhání. Poslední třetí model, jehož substrátem je niobičnan lithný, je již trojrozměrný. V tomto případě byly měněny parametry struktury a byl pozorován vliv změn na rychlost vlny při vlnové délce SAW vlny korespondující se vzdáleností dvou sousedních elektrod se stejným elektrickým potenciálem. Největší vliv v tomto případě má hlavně materiál substrátu a zásadní je také vzdálenost elektrod interdigitálního měniče. Rychlost akustické vlny dosahuje hodnot řádově  $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$  a nejnižší z nich bylo dosaženo v piezoelektrické keramice PZT-5H. Vlna se v tomto materiálu šířila téměř poloviční rychlostí, což bylo způsobeno převážně vysokými hodnotami v matici relativní permitivity. Změna mezery mezi sousedními elektrodami se na rychlosti projevila nepřímou úměrou, když při zvětšení mezery rychlost klesla a naopak.

Parametrickou analýzou pak byla zobrazena frekvenční závislost admitance a maximálního mechanického namáhání ve struktuře. Z těchto grafů bylo zřetelné, že struktura rezonuje. Souvislost admitance a mechanického namáhání byla zřejmá. Na frekvencích, kde bylo zjištěno největší mechanické pnutí ve struktuře, rezonoval vid s povrchovou vlnou, neboť se energie soustředila pouze u povrchu substrátu. Admitanční charakteristika byla podrobena globální optimalizační rutině algoritmem PSO, přičemž byla rezonance přesunuta na jinou frekvenci. Proces našel několik optimálních řešení, které byly prezentovány v grafech frekvenčních závislostí admitance a mechanického pnutí. Kompromisem mezi kvalitou výsledků a rychlostí výpočtů byla optimalizace pro 10 iterací a 100 jedinců, která trvala přibližně 4 hodiny. Přenosovou charakteristiku by v použitém modulu nebylo možno namodelovat pro takto jednoduchou strukturu, která sloužila převážně jako seznámení se s problematikou buzení povrchové vlny. Pro simulace přenosové charakteristiky a ztrát v materiálu by bylo vhodné zvolit akustický modul programu Comsol Multiphysics, který ovšem ústav radioelektroniky nemá k dispozici, nebo by musela být modelována komplexnější trojrozměrná struktura, což by rapidně prodloužilo výpočet optimalizace.

V poslední části práce pak byla ještě zkoumána závislost určení rezonančních frekvencí a fázových rychlostí na kvalitě sítě konečných prvků. Zde při použití jednoduché struktury byla relativní chyba nejhrubější sítě vztažená k vypočteným

rychlostem nebo frekvenci až 2,5 %. A v případě složitější struktury by tedy bylo nutné ji zohlednit i přes nutnou úsporu času výpočtu. Při závěrečném srovnání dosažených výsledků s komerčně vyráběnými komponentami bylo nutné vzít v úvahu, že nebylo dosaženo přenosové charakteristiky, pro kterou bylo toto srovnání míněno. Přenosové charakteristiky reálných součástek dosahují různých šířek propustného pásma a útlum na okolních frekvencích od 15 až 20 dB do 50 dB a více. Impedance, které jsou v katalogových listech uváděny, jsou již přizpůsobeny pro integraci do reálných obvodů, avšak na některých nižších frekvencích se řádově přibližují hodnotám získaných ze simulací. Materiálem je často používána sloučenina oxidu křemíku, a to křemen, ve kterém se akustická vlna šíří optimální rychlostí přes  $3 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vstupní napětí na elektrodách IDT bývá maximálně kolem 10 V.

Na závěr je třeba poznamenat, že problematika šíření akustické povrchové vlny není prozatím příliš probádána ve spojitosti s programem Comsol Multiphysics. Vědecké články pojednávají především o vybuzení povrchové vlny na piezoelektrickém substrátu, což je v této práci zvládnuto a je tedy považována převážně jako výchozí bod pro další zpracovávání daného problému. Je možné dále rozšiřovat dosažené výsledky. Vhodné je hlavně prozkoumat spojitost mezi přenosovou a admitanční charakteristikou, kde by se mohlo dokázat to, že maximální přenos, a tedy minimální ztráty, nastávají právě na frekvencích, na kterých dochází k rezonanci SAW vlny související s velkým mechanickým pnutím struktury při jejím povrchu. Dále pak vliv nežádoucích vidů na přenosovou charakteristiku, který už by neměl být tak intenzivní, poněvadž je energie rozložena v celé struktuře dané komponenty.

# LITERATURA

- [1] COMSOL Multiphysics 3.4 User's Guide. Stockholm: Comsol AB, 2007.
- [2] Internetová encyklopedie [online], dostupné na: <http://en.wikipedia.org/wiki/>.
- [3] JIRÁK, J. a kol. *Materiály a technická dokumentace*, skriptum. Brno: VUT, 2006.
- [4] PHONON Corporation, *What is the SAW device?* [online], dostupné na [www: http://www.phonon.com/whatis.asp?lrt=7](http://www.phonon.com/whatis.asp?lrt=7).
- [5] SCHEERSCHMIDT, G., KIRK, K. J., McROBBIE, G. *Finite element analysis of resonant frequencies in surface acoustic wave devices*. In Proceedings of the 2006 Birmingham COMSOL Conference [online]. Dostupné na [www: http://cds.comsol.com/access/dl/papers/1683/Scheerschmidt.pdf](http://cds.comsol.com/access/dl/papers/1683/Scheerschmidt.pdf).
- [6] J.D.N. Cheeke, *Fundamentals and Application of Ultrasonic Waves*, CRC Press (2002).
- [7] CARSTEN D. B., CHRISTENSEN, T. A., WILLATZEN, M. *Surface acoustic wave (SAW) generation in Wurtzite and Zinblendé piezoelectric materials*. In Proceedings of the 2006 Nordic COMSOL Conference [online]. Dostupné na [www: http://cds.comsol.com/access/dl/papers/1605/Carstensen.pdf](http://cds.comsol.com/access/dl/papers/1605/Carstensen.pdf).
- [8] KRISHAN, N. R., NEMADE, H. B., PAILY, R. *Simulation of One-Port SAW Resonator using COMSOL Multiphysics*. In Proceedings of the COMSOL Users Conference 2006 Bangalore [online]. Dostupné na [www: http://cds.comsol.com/access/dl/papers/1586/Nemade.pdf](http://cds.comsol.com/access/dl/papers/1586/Nemade.pdf).
- [9] ČERNOHORSKÝ, D., SVAČINA, J., NOVÁČEK, Z. *Teorie elektromagnetického pole II*, skriptum. Brno: VUT, 1987.
- [10] RAIDA, Z. *Počítačové řešení komunikačních systémů*, skriptum. Brno: VUT, 2006.
- [11] RAIDA, Z. a kol. *Multimediální učebnice EM vln a mikrovlnné techniky* [online], dostupné na [www: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.html](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.html).
- [12] RAIDA, Z. *Optimalizace v elektrotechnice* [online], dostupné na [www: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/optimalizace/index.htm](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/optimalizace/index.htm).
- [13] ROBINSON, J., RAHMAT-SAMII, Y. *Particle swarm optimization in electromagnetics*, IEEE Transactions on Antennas and propagation. 2004, vol. 52, no. 2, p. 397-407.
- [14] *Encyklopedie fyziky* [online], dostupná na [www: http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=1](http://fyzika.jreichl.com/index.php?sekce=browse&page=1).
- [15] APC International Ltd., *Piezo Theory* [online], dostupné na [www: http://www.americanpiezo.com/](http://www.americanpiezo.com/).
- [16] ZAKI, A., ELSIMARY, A., ZAGHLOUL, M. *Miniature SAW device using MEMS technology*. Microelectronics Journal, 2006, vol. 38, issue 3, p. 426-429 [online]. Dostupné na [www: http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=MImg&\\_imagekey=B6V44-4MX54XS-1-1&\\_cdi=5748&\\_user=640830&\\_pii=S0026269206002783&\\_orig=search&\\_coverDate=03%2F31%2F2007&\\_sk=999619996&view=c&wchp=dGLbVIW-zSkzV&md5=1a72279d138b84e0c252ce37f80edcfff&ie=/sdarticle.pdf](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MImg&_imagekey=B6V44-4MX54XS-1-1&_cdi=5748&_user=640830&_pii=S0026269206002783&_orig=search&_coverDate=03%2F31%2F2007&_sk=999619996&view=c&wchp=dGLbVIW-zSkzV&md5=1a72279d138b84e0c252ce37f80edcfff&ie=/sdarticle.pdf).
- [17] EPCOS, *Data Sheet B3550*, 2001, 8 s. [online]. Dostupné na [www: http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/B/3/5/5/B3550.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/B/3/5/5/B3550.shtml).

[18] MITEL Semiconductor, Data Sheet DW9255, 1997, 6 s. [online]. Dostupné na [www:  
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/D/W/9/2/DW9255.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/D/W/9/2/DW9255.shtml).



# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$c_1$	Vážený faktor pro lokální optimalizační minimum
$c_2$	Vážený faktor pro lokální optimalizační maximum
$c_n$	Člen pro optimalizační podmínky
$d_n$	Žádaná hodnota parametrů optimalizace
$dl$	Změna rozměrů
$E$	Youngův modul
$f$	Frekvence
$F(x)$	Kriteriální funkce
$g_{best}$	Globální optimalizační minimum
$h$	Výška substrátu
$H$	Intenzita magnetického pole
$L$	Délka substrátu
$n$	Počet úseků $p$
$p$	Vzdálenost středů sousedních elektrod
$p_{best}$	Lokální optimalizační minimum
$Q$	Elektrický náboj
$S$	Mezera mezi elektrodami interdigitálního měniče
$v_f$	Fázová rychlost povrchové vlny
$v_n$	Aktuální rychlost pohybu jedinců
$v_{n+1}$	Nová rychlost pohybu jedinců
$V_0$	Elektrický potenciál
$x_n$	Aktuální pozice jedince
$x_{n+1}$	Nová pozice jedince
$y_n$	Parametry optimalizovaného systému
$\Delta t$	Délka iteračního kroku
$\epsilon_r$	Relativní permitivita
$\Gamma$	Okrajová podmínka pro vstupní a výstupní stěnu substrátu
$\lambda_{SAW}$	Vlnová délka povrchové akustické vlny
$\rho$	Hustota
$\nu$	Poissonovo číslo



$\delta\Omega_+$	Okrajová podmínka pro kladný elektrický potenciál
$\delta\Omega_-$	Okrajová podmínka pro záporný elektrický potenciál
$\delta\Omega_n$	Okrajová podmínka pro boční stěnu substrátu
$\delta\Omega_p$	Okrajová podmínka pro přední stěnu substrátu
2D	Two Dimensions, dvě dimenze
3D	Three Dimensions, tři dimenze
IDT	Interdigital Transducer, interdigitální měnič
LPCVD	Low-Pressure Chemical Vapor Deposition, chemické napařování při nízkém tlaku
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems, mikro-elektro-mechanické systémy
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition, chemické napařování vrstvy plasmu
PSO	Particle Swarm Optimization, metoda roje částic
PZT-5H	Lead Zirconate Titanate, piezokeramika
SAW	Surface Acoustic Wave, akustická povrchová vlna

# PŘÍLOHY

```
function out = main( G, I)
% hledání matice relativní permitivity piezomateriálu SAW filtru
% G je počet iteračních kroků (generací), I je počet jedinců
dt = 0.1; % délka iteračního kroku
c1 = 1.49; % vážený faktor pro pbest
c2 = 1.49; % vážený faktor pro gbest

f = [402.0, 402.5, 403.0]*1e6; % frekvence optimalizace
ad = [250.0, 0.0, -40.0]; % požadované hodnoty admitance
av = zeros( 1, 3); % činitel přenosu
x = zeros( I, 4); % pozice jedinců
p = zeros( I, 4); % lokální optimum

for n = 1:I
    x( n, 1:3) = ones( 1, 3) + 1999*rand( 1, 3);
% inicializace optimalizace
    p( n, 1:3) = x( n, 1:3);
% vložení počátečních hodnot fitness do pbest
    p( n, 4) = x( n, 4);
end

v = rand( I, 3); % náhodné počáteční rychlosti
g = zeros( 1, 3); % globální optimum
e = zeros( G+1, 1); e(1) = 1e+3; % chybová funkce

for m = 1:G % +++ OPTIMALIZAČNÍ SMYČKA +++
    w = 0.5*(G-m)/G + 0.4; % inerční šířka

    for o = 1:3
        for n = 1:I
            av( n, o) = pzt5h( x( n,1:3), f(o)); % funkce SAW filtru
        end;
    end;

    x( :, 4) = zeros( I, 1);

    for n=1:3
        x( :,4) = x( :,4) + ( ad(n) - av( :,n)).^2; % kriteriální
funkce
    end

    [hlp, ind] = min( (( ad(:)-av( 1,3)).^2)); % nejmenší chyba

    if hlp < e(m)
        g = x( ind, 1:3); % určení gbest
        e(m+1) = hlp;
    else
        e(m+1) = e(m);
    end

    for n = 1:I
        if x( n,3)<p( n,3) % určení pbest
            p( n, :) = x( n, :);
        end
    end
end
```

```

v( n,:) = w*v( n,:) + c1*rand()*( p( n,1:3)-x( n,1:3));
v( n,:) = v( n,:) + c2*rand()*( g( 1,1:3)-x( n,1:3));
x( n,1:3) = x( n,1:3) + dt*v( n,:);
    if x( n, 1:3) > 2000, x( n, 1:3) = 2000; end
    % absorbní stěna - vrátí permitivitu do vymezeného intervalu
end
end
semilogy( e); % vykreslení průběhu chybové funkce
title( 'Chybová funkce PSO');
xlabel( 'Počet iterací');
ylabel( 'Chybová funkce');
out = g; % výpis optimalizovaných hodnot permitivit

```