

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Rotační elektrostatické mikromotory**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr SOUČEK**  
Osobní číslo: **E11B0077P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Rotační elektrostatické mikromotory**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Uveďte, popište a porovnejte druhy rotačních elektrostatických mikroaktuátorů.
2. Formulujte problém, sestavte matematický model a vytvořte algoritmus pro výpočet.
3. Realizujte numerický model na počítači a výsledky zhodnoťte.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Husák, Miroslav. Mikrosenzory a mikroaktuátory. Vyd. 1. Praha: Academia, 2008. 540 s. Gerstner; sv. 3. ISBN 978-80-200-1478-8
2. Sarajlic, E.; Yamahata, C.; Cordero, M.; Jalabert, L.; Iizuka, T.; Fujita, H., "Single mask 3-phase electrostatic rotary stepper micromotor," Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2009. TRANSDUCERS 2009. International , vol., no., pp.1505,1508, 21-25 June 2009
3. Mayer, Daniel. Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry. 1. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012. 531 s. ISBN 978-80-7232-424-8.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. David Pánek, Ph.D.  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013

Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá rozdělením a porovnáním elektrostatických mikroaktuátorů. Součástí bakalářské práce je také sestavení modelu v programu Comsol Multiphysics. Dále se v práci nachází popis modelovaného aktuátoru s proměnou kapacitou a matematický model výpočtu elektrostatického pole aktuátoru.

## **Klíčová slova**

Elektrostatické mikroaktuátory, elektrostatické pole, energie elektrostatického pole, coulombovské síly v elektrostatickém poli.

## Abstract

The bachelor's thesis deals with division and comparison of electrostatic microactuators. Another part of bachelor's thesis is assembling of model in Comsol Multiphysics program. Next thing which can be found in following document is description of an modeled actuator with variable capacitance and mathematical model of calculation for electrostatic field.

## Key words

Electrostatic microactuators, electrostatic field, electrostatic energi, coulombic forces in electrostatic field.

## Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2014

Petr Souček

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Pánkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## **Obsah**

Obsah .....	8
Seznam symbolů a zkratk .....	9
Úvod .....	11
1. Elektrostatické rotační mikroaktuátory .....	12
1.1. Elektrostatické Curieovo kolo .....	14
1.2. Excentrický valivý motor.....	14
1.3. Elektrostatický indukční motor.....	15
1.4. Elektrostatické motory s proměnnou kapacitou (VCM).....	16
1.5. Porovnání rotačních mikroaktuátorů .....	19
2. Parametry a sestavení modelu VCM.....	21
2.1. Formulace problému .....	21
2.2. Sestavení matematického modelu.....	23
2.3. Algoritmus pro výpočet .....	26
3. Zhodnocení výsledků simulace .....	30
4. Závěr .....	36
Seznam literatury a informačních zdrojů.....	38



## Seznam symbolů a zkratk

MEMS	Mikroelektromechanické systémy
HEXSIL	Hexagonal honeycomb poly silicon
HARPSS	High aspect ration poly and single silicon
LIGA	Litographie galvanofornung abfornung
RIE	Reactive ion etching
DRIE	Deep reacting ion etching
SCREAM	Single crystal reactive etch and metalization
VCM	Aktuátor s proměnou kapacitou
CAD	Computer aided desing
KOH	Hydroxid draselný
GaAs	Arsenid galnitý
Si	Křemík
Poly-Si	poly-křemík
SiO <sub>2</sub>	Oxid křemičitý
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Nitrid křemičitý
InGaAs	Induum galium arsenid
GaN	Galium nitrid
AlGaN	Aluminium galium nitride
LiNbO <sub>3</sub>	Lithium niobate
BaTiO <sub>3</sub>	Barium titanate
Al	hliník
P	Tlak [Pa]
E	Intenzita elektrického pole [V/m]
D	Elektrostatická indukce [C/m <sup>2</sup> ]
σ	Plošná hustota náboje [C/m <sup>2</sup> ]
H	Intenzita elektromagnetického pole [A/m]
J	Proudová hustota [A/m <sup>2</sup> ]
B	Elektromagnetická indukce [T]
F	Síla [N]
Q	Náboj [C]
ε	Permitivita [F/m]
φ	Elektrický potenciál [V]
ρ	Objemová hustota náboje [C/m <sup>3</sup> ]

$W_c$	.....	Energie elektrostatického pole [J]
$\alpha$	.....	Úhel natočení rotoru proti aktivním statorovým elektrodám [°]
$\beta$	.....	Úhel otočení rotoru [°]
$M$	.....	Kroutící moment [Nm]
$V$	.....	Objem [m <sup>3</sup> ]
$T$	.....	Maxwellův tenzor pnutí
$MR$	.....	Maxwellovi rovnice

## Úvod

Bakalářská práce je zaměřena na výpočet elektrostatického pole v prostředí programu Comsol Multiphysics.

Text práce je rozdělen do tří hlavních částí. První část textu se zabývá rozdělením elektrostatických rotačních mikromotorů, jejich vlastnostmi, principy funkce a popisem jejich struktury.

Následující část je věnována formulaci problematiky modelu elektrostatického rotačního mikroaktuátoru s proměnou kapacitou, zahrnující popis materiálů a struktury. V druhé části se také nachází sestavení matematického modelu popisujícího nastavené elektrické vlastnosti potřebné pro výpočet pole a nakonec vztahy naznačující algoritmus pro výpočet.

Poslední část práce je věnována zhodnocení výsledků simulace vytvořené v programu Comsol Multiphysics.

## 1. Elektrostatické rotační mikroaktuátory

Elektrostatické mikroaktuátory nachází uplatnění především v mikroskopických aplikacích, kde je jejich energie srovnatelná s energií magnetickou. Pokud bychom chtěli elektrostatické principy pohonu použít u větších celků, tak energie elektromagnetická značně převýší energii elektrostatickou a takovýto typ pohonu je tedy nevýhodný. Většina elektrostatických mikrostruktur je vyráběna z materiálu na bázi křemíku. Tyto materiály mají rozmanité dielektrické vlastnosti a jsou dobře aplikovatelné v technologických postupech při výrobě elektrostatických mikroaktuátorů [10].

U elektrostatických mikroaktuátorů hrozí průraz dielektrika vlivem poměrně velkých napájecích napětí. Při vzdálenosti desek 1  $\mu\text{m}$  mluvíme o napětí přibližně 150V pro vytvoření tlaku aktuátoru 100 kPa, přitom nesmí být překročena elektrická pevnost dielektrika, nejčastěji vzduchu, tzn.  $E_p_{\text{vzduch}} = 3 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}$  [12]. Síla, kterou je aktuátor schopen vyvinout, je přímo úměrná kapacitě aktuátoru a nepřímo úměrná vzdálenosti desek. Je tedy výhodné projektovat aktuátory s co nejmenší vzdáleností elektrod [2].

Pro výrobu elektrostatických mikroaktuátorů je využívána řada technologií. Ty jsou aplikovány zejména v návaznosti na tvar, rozměry a uspořádání struktury aktuátoru. Mezi základní technologické procesy patří:

- Objemové mikroobrábění (*bulk micromachining*)

Objemové mikroobrábění je proces vytváření struktury z objemu základního materiálu. Specifické struktury jsou tvořeny za pomoci selektivního odstraňování částí substrátu (Si, GaAs atd.) především za pomoci různých druhů leptání. Pomocí této technologie jsme schopni vytvořit různé komponenty MEMS užívané pro senzory a aktuátory (nosníky, membrány, destičky). Mezi metody selektivní odstraňování materiálu můžeme zařadit [9]:

- Izotropní leptání
- Anizotropní leptání
- RIE (Reactive Ion Etching)
- DRIE (Deep Reactive Ion Etching)
- SCREAM (Single Crystal Reactive Etch and Metallization)
- Post-CMOS

Izotropní a anizotropní leptání se řadí mezi mokrá leptání pomocí roztoku KOH. RIE, DRIE společně s SCREAM a post-CMOS řadíme mezi suchá leptání.

- Povrchové mikroobrábění (*surface micromachining*)

Hlavní výhodou povrchového mikroobrábění proti jiným technologickým postupům je možnost vytvoření pohyblivých struktur s velice malými rozměry, které jsou snadno aplikovatelné na plošné spoje společně s elektronikou. Toto zvyšuje spolehlivost a umožňuje aplikaci MEMS společně s elektronikou do jednoho pouzdra. Povrchové mikroobrábění také umožňuje vytvoření složitých uspořádání, jako jsou: akcelerometry, gyroskopy, mikrozrcátkové optické přepínače, radiofrekvenční spínače, mikropinzety a další [9].

Technologický proces zahrnuje depozici (nanášení materiálu), leptání a následné odstranění nežádoucího materiálu pro uvolnění funkční struktury.

- Mikroobrábění struktur s velkým poměrem geometrických rozměrů

Pro výrobu struktur s velkým poměrem vertikálních a horizontálních rozměrů byly vytvořeny speciální technologické postupy [9]:

- Anizotropní směrové leptání s polymerovou směrovou pasivací  
Využívá se pro zhotovení průchodek, nebo k bočnímu leptání substrátu. Také se využívá pro výrobu tekutinových systémů, např. mikropump.
- HEXSIL (HEXagonal honeycomb polySILicon)  
Pro systémy s velkým poměrem hloubka-šířka.
- HARPSS (High Aspect Ration combined with Poly and Single-Crystal Silicon)  
Realizuje elektricky izolované polykrystalické a monokrystalické křemíkové mikrostruktury s kapacitní vzduchovou mezerou a rozměry od submikrometrů do desítek mikrometrů. Výroba inertních senzorů.
- LIGA (LItographie Galvanoformung Abformung)  
Tato technologie umožňuje pokročilé tvarování kovů, plastů, keramiky a skla. Používá se pro struktury s velkým geometrickým rozlišením a výškou až 1000  $\mu\text{m}$

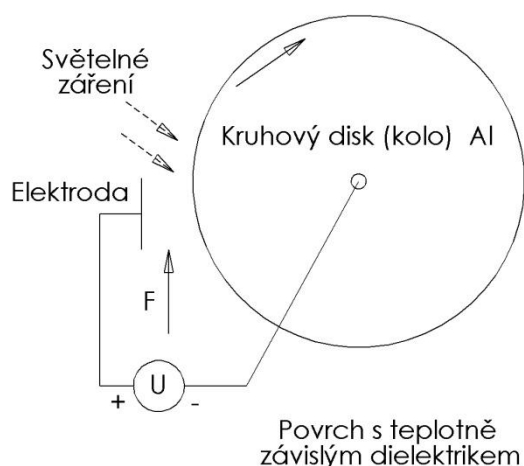
Rozměry dosahované výrobními procesy jsou od jednotek až po tisíce mikrometrů v [9].

Rotační mikroaktuátory, stejně jako jiné elektrostatické mikroaktuátory, využívají coulombovských sil mezi opačně nabitými částicemi k vykonání pohybu aktuátoru. Mezi používané materiály patří zejména sloučeniny na bázi Si (Poly-Si, SiO<sub>2</sub> a Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), využívané jsou však také materiály jako GaAs, InGaAs, AlGaAs, GaN, AlGaN, LiNbO<sub>3</sub> [10, 9].

## 1.1. Elektrostatické Curieovo kolo

Curieovo kolo se skládá z několika základních částí, a sice pevné elektrody kondenzátoru, Al disku, na jehož povrchu se nachází tenká vrstva feromagnetického materiálu (např.  $\text{BaTiO}_3$ ) a tepelného zdroje zahřívajícího část disku (Obrázek 1).

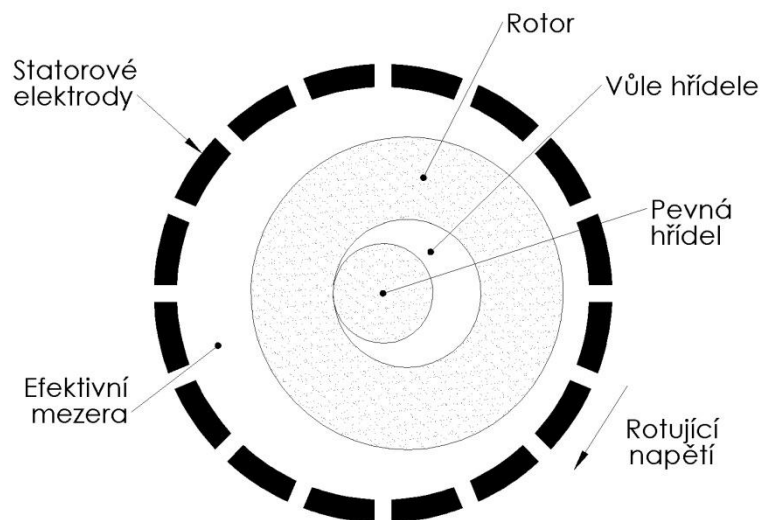
Princip funkce aktuátoru spočívá v ohřátí části feroelektrického materiálu nad Curieovu teplotu. Tato teplota má vliv na permitivitu materiálu. Do Curieovy teploty je permitivita téměř konstantní, po překročení této teploty začne prudce klesat. Curieova teplota pro daný materiál je závislá na dotování a pohybuje se v rozmezí od  $50^\circ\text{C}$  do  $180^\circ\text{C}$ . Ohřátí materiálu má vliv na síly působící na Al kotouč. Vlivem malé permitivity v části Al kotouče u elektrody dojde k působení sil na kotouč. Aktuátor se snaží vtáhnout část s větší permitivitou. Typické rozměry aktuátoru jsou: Vzdálenost pevné desky od kola  $1\mu\text{m}$ , šířka kola a pevné elektrody kondenzátoru  $100\mu\text{m}$ , poloměr kola  $500\mu\text{m}$  [2].



Obrázek 1 Curieovo kolo [2]

## 1.2. Excentrický valivý motor

Valivý motor využívá excentrického uložení rotoru, který provádí valivý pohyb okolo pevně uchycené hřídele. Pohyb rotoru je zajištěn pomocí správného buzení elektrodového pole okolo rotoru. Rotor je vždy přitážen k elektrodě pod napětím, což ho nutí vykonávat rotační pohyb. Rotor aktuátoru je uzemněn a tvoří druhou elektrodu pro elektrostatické pole. Excentrické uložení umožňuje změnu vzdálenosti k buzené elektrodě, což je příčinou pohybu (Obrázek 2) [2].



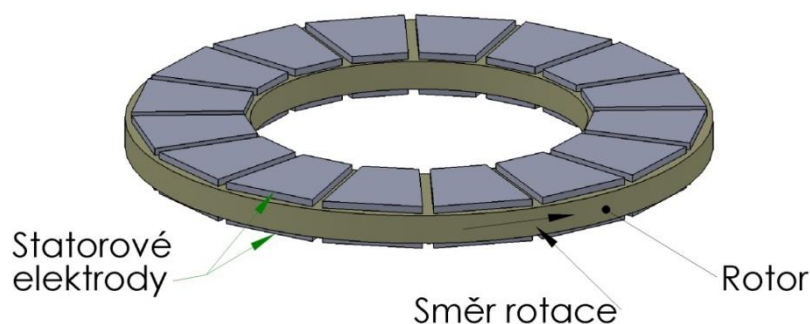
Obrázek 2 Excentrický mikromotor [2]

Mikromotor je schopen dosahovat rychlosti až 1000 ot/min při budícím napětí 100V. Jeho rozměry jsou závislé na technologických postupech uplatněných při výrobě a specifickém užití aktuátoru. Mezera statorové a rotorové elektrody je v jednotkách mikrometrů a průměr struktury 50 až 150  $\mu\text{m}$  [2].

### 1.3. Elektrostatický indukční motor

Indukční mikromotor je motor asynchronní. Nevyžaduje informaci o poloze hřídele aktuátoru, na rozdíl od excentrického valivého motoru a motoru s proměnnou kapacitou. Tyto aktuátory jsou synchronní a tuto informaci potřebují [1].

Motor sestává z vodivého prstence, okolo kterého jsou rozmístěny elektrody statorového pole po celém obvodu. Postupným sekvenčním buzení se vybudí rotující elektrické pole, které se indukuje pod aktivní elektrodou do vodivého prstence. Místo s indukovaným napětím je taženo statorovým polem se zpožděním. Toto zpoždění indukovaného napětí je způsobeno špatnou vodivostí rotoru aktuátoru. Výsledkem elektrického pole je síla s tangenciální a normálovou složkou, která nutí rotor k pohybu ve směru sekvenčně buzeného pole statoru (Obrázek 3) [2].



Obrázek 3 Indukční motor [2]

Obvykle jsou ve statoru umístěny čtyři elektrody. Mikromotor dosahuje až 55000 ot/min při budícím napětí okolo 100V o frekvenci až 200 kHz. Tloušťka rotoru je 1  $\mu\text{m}$ , vnitřní poloměr je v desítkách mikrometrů [2, 1].

#### 1.4. Elektrostatické motory s proměnnou kapacitou (VCM)

Princip činnosti elektrostatického mikroaktuátoru s proměnnou kapacitou spočívá, stejně jako u ostatních rotačních aktuátorů, v coulombovských silách působících na částice s opačným nábojem. Po přiložení napětí mezi stator a rotor se vytvoří elektrické pole, které se snaží zmenšit vzdálenost mezi napájenými elektrodami. Vzhledem k zamezení pohybu směrem vychýlení rotoru z osy, je rotor silami nucen k rotačnímu pohybu [3]. Spínání elektrod je závislé především na struktuře aktuátoru, respektive tvaru rotoru. Tvarem ovlivňujeme jak velikost působící síly, tak množství spínaných statorových elektrod [2].

Mikromotor lze provozovat v jiných prostředích než pouze ve vzduchu. Zatím byly zrealizované varianty pracující ve vzduchu, silikonovém oleji a neionizované vodě. Provozní prostředí zvyšuje elektrickou pevnost mezi statorem a rotorem. Tím se nabízí možnost připojení většího napětí vedoucího k většímu aktuátorovému tlaku [2].

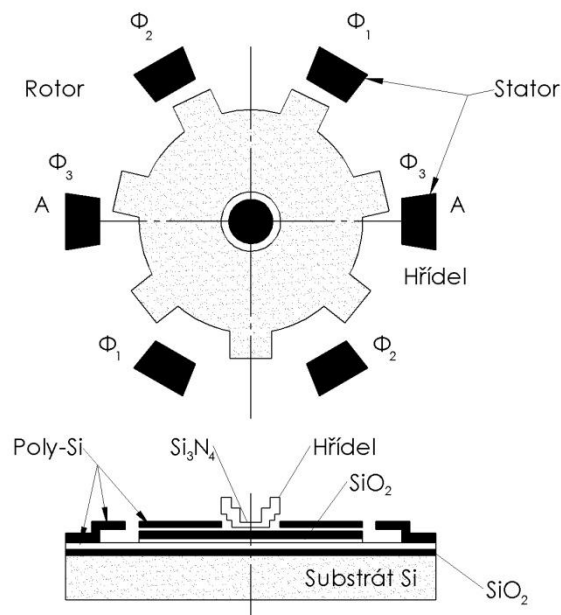
Vzdálenost mezi póly statoru a rotoru se pohybuje mezi 1-3  $\mu\text{m}$ . Budící napětí je 30-120V. Mikromotor je schopen dosahovat až 15000 ot/min (Top-Drive) a 500 ot/min (Side-Drive). [1, 2, 10, 11].

Uspořádání aktuátoru z hlediska funkce může být velmi různorodé. Limitujícími faktory při realizaci struktury jsou výrobní technologie, elektrická pevnost izolačního materiálu mezi



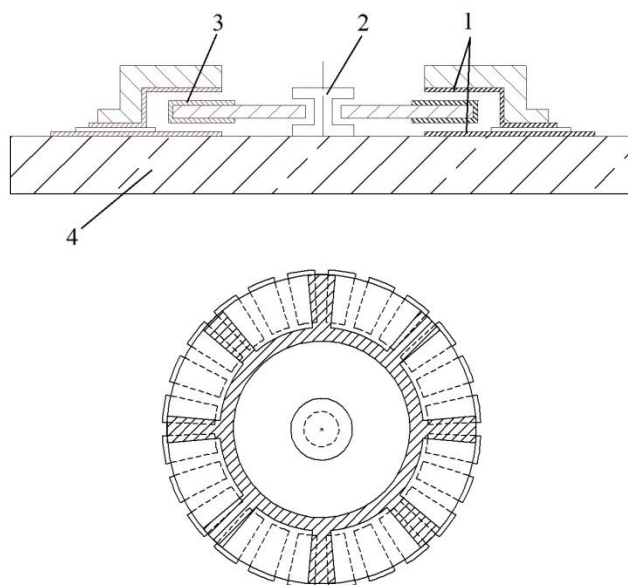
elektrodami a mechanické vlastnosti použitých materiálů. Jednotlivá uspořádání se budou tedy lišit materiály, silovými účinky aktuátoru a elektrickými parametry ovládacího napětí.

V obrázku 4 je zobrazeno Side-Drive uspořádání elektrod s popisem použitých materiálů. Side-Drive uspořádáním rozumíme, že statorové elektrody jsou umístěny v jedné horizontální rovině s rotorovými elektrodami [1, 10].



Obrázek 4 Motor s proměnou kapacitou, Side-drive [2]

Dalším možným uspořádáním elektrod je Top-Drive, zobrazené na obrázku 5. Výroba takového uspořádání je technologicky náročnější než uspořádání z obrázku 4, výhodou je větší aktivní plocha elektrod a tedy větší silové působení aktuátoru [1, 11].



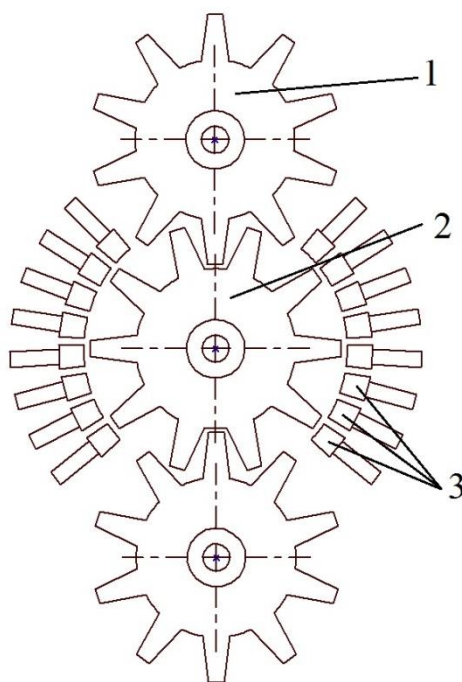
Obrázek 5 Top-drive uspořádání [11]

V obrázku 5 vidíme Top-Drive uspořádání, kde statorové elektrody 1 jsou umístěny vertikálně nad rotorovými elektrodami 3. Celá struktura je uchycena na substrátu 4. Stabilitu rotoru zajišťuje centrální hřídel 2.

V první generaci VCM docházelo k nestabilitám rotoru, který při výchylce z centrální osy dotykem se statorovými elektrodami způsoboval zkrat. Tento problém byl později vyřešen elektrickým propojením rotoru a substrátu a uzemněním obou částí. Toto uzemnění odstranilo nestability rotoru [1].

Celkové rozměry rotoru a tedy i celého aktuátoru jsou závislé na tloušťce vrstvy  $\text{SiO}_2$ , ze které je rotor vyroben. Jeho mechanická pevnost při maximální tloušťce je limitním faktorem strukturální integrity aktuátoru. Vlivem výrobního procesu je tedy velikost VCM omezena na desítky mikrometrů. To má vliv na velikost aktivní části elektrod a tedy i na maximální moment aktuátoru [1].

Motor s proměnnou kapacitou má, stejně jako ostatní aktuátory, využití v systému jako koncový člen převodu elektrického signálu, zpracovaného nejčastěji integrovanými obvody, na mechanický pohyb [9].



Obrázek 6 Aplikace VCM [10]

Příkladem mechanického převodníku může být rozložení z obrázku 6, kde rozteč rotorových pólů 2 odpovídá rozměrům mechanického převodu 1, přenášejícího moment aktuátoru dále do systému. Rozložení statorových elektrod 3 je uzpůsobeno mechanickému převodu energie [10].

### 1.5. Porovnání rotačních mikroaktuátorů

Pro každý z jednotlivých rotačních aktuátorů jsou specifické vlastnosti, rozměry aplikace i použité materiály.

Elektrostatické Curieovo kolo má větší rozměry než ostatní aktuátory, při výšce aktuátoru 100 mikrometrů a šířce blízké se milimetru je jeho aplikace omezená vzhledem k rozměrům mikrosystému. Je také potřeba technologicky zajistit správné dotování materiálu pro optimální teplotní závislost. Svými vlastnostmi se hodí pro aplikaci v případech, kdy je potřeba uplatnit rotační pohyb v souvislosti s překročením stanovené teploty.

Excentrický valivý motor má podobné rozměry jako VCM a Indukční mikromotor. Specifický excentrický pohyb vykonávaný rotorem aktuátoru značně sťažuje jeho aplikaci. Přímý převod rotačního pohybu do dalších částí struktury je složitý, vzhledem k měnící se poloze středu rotoru. Takovýto aktuátor je tedy vhodné použít pro případy, kdy není nutný mechanický převod rotačního pohybu. Výhodou oproti Curieovu kolu jsou použité materiály, pro které nejsou nutné speciální úpravy dotováním, nevýhodou je právě excentricky uložený

rotor společně s faktem, že budící pole je vytvořeno pouze jednou elektrodou, což má za následek menší dosahovaný moment, než v případě VCM a Indukčního mikromotoru.

Indukční mikromotor dosahuje stejných rozměrů jako VCM a Excentrický motor. Díky používaným materiálům a odlišné konstrukci však není limitován rozměry rotoru, tak jako je tomu u VCM. Výhodou Indukčního mikromotoru jsou dosahované otáčky, které jsou výrazně vyšší než u ostatních aktuátorů. Takových otáček může být dosaženo především díky faktu, že mikromotor nevyžaduje informaci o poloze rotoru. Maximální otáčky jsou tedy omezeny pouze strukturálními parametry, zejména třecími ztrátami na ložiskách a v prostředí rotoru. Z uváděných aktuátorů dosahuje tato struktura nejvyššího momentu.

Mikromotor s proměnnou kapacitou dosahuje nižších otáček než Indukční mikromotor. Dosahovaný moment je také výrazně nižší než v případě indukčního motoru. Použité materiály nepotřebují zvláštní úpravy, tudíž kladou menší požadavky na výrobní proces. Výsledný moment je závislý na konkrétní zvolené struktuře aktuátoru. Side-Drive VCM dosahují nižšího momentu při jednodušší konstrukci. Naproti tomu Top-Drive VCM mají násobně vyšší moment, ovšem za cenu složitějšího uspořádání a tím i složitější výroby.

<b>Mechanismus</b>	<b>Elektrický indukční</b>	<b>Magnetický indukční</b>	<b>VCM</b>
<b>Moment</b>	3.5 $\mu$ Nm	2.5 $\mu$ Nm	12 pNm
<b>Maximální výkon</b>	20 mW	-	-
<b>Napájecí napětí/proud</b>	95 V	8	37-150 V
<b>Napájecí frekvence</b>	200 kHz	35 kHz	-
<b>Rychlost otáček rotoru</b>	55000 rpm	0	<15000
<b>Vzduchová mezera</b>	1.8 $\mu$ m	50 $\mu$ m	1.5 $\mu$ m

Tab. 1 Porovnání aktuátorů [1]

## 2. Parametry a sestavení modelu VCM

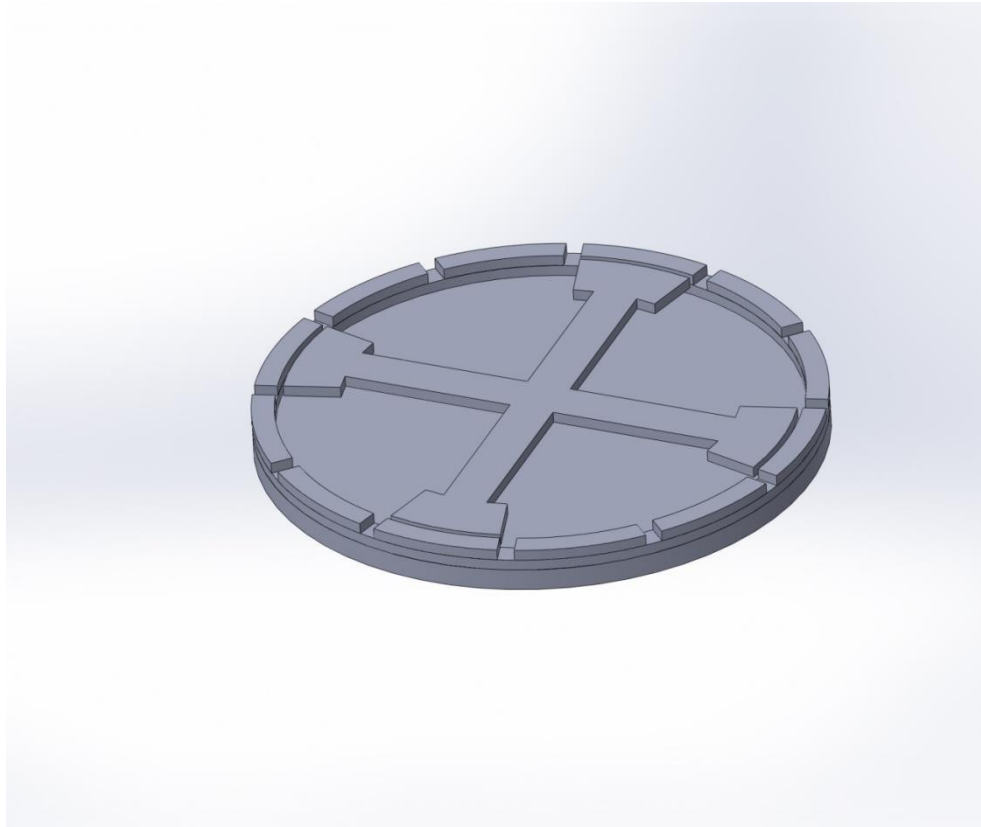
Při projektování aktuátoru je potřeba dodržet postup, který zajistí použití správných materiálů a umožní nám stanovit technologické postupy vhodné pro výrobu zařízení. Při uvážení nároků je vhodné použití CAD systémů (Computer-aided desing). Tyto systémy nám také umožňují ověřit funkčnost a nahlédnout do základních fyzikálních procesů uvnitř zařízení, jako jsou například teplota nebo síly působící na strukturu [4]. V našem případě se však jedná pouze o rozložení pole uvnitř aktuátoru a problematikou technologických postupů se zabývat nebudeme.

Pro výpočet a určení pole byl zvolen program Comsol Multiphysics. Jedná se o profesionální prostředí s možností výpočtu rozsáhlých fyzikálních problémů, nejen z oblasti elektrostatiky, ale také teplotního pole, šíření vlnění a dalších. Bohužel pro výpočet rotačních elektrostatických mikroaktuátorů se modul v Comsolu nenachází. Proto byl použit modul pro výpočet elektrostatického modelu. Rotační pohyb aktuátoru bude tedy simulován postupnou změnou polohy rotoru aktuátoru a dílčí krok  $\Delta\alpha$ . Pro simulované polohy rotoru bude zaznamenána energie pole a působící moment.

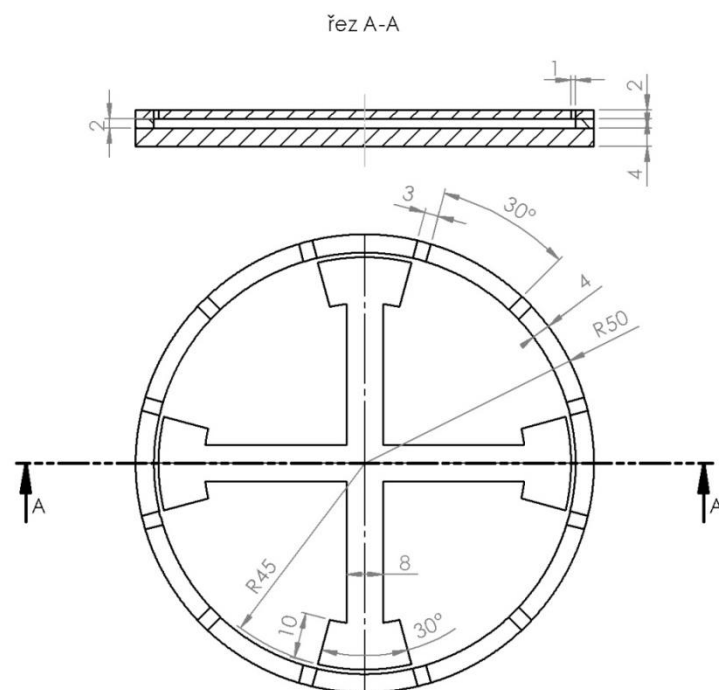
### 2.1. Formulace problému

Jako předmět modelování byl zvolen VCM s uspořádáním elektrod Side-drive, viz kapitola 1.4. Modelovaný aktuátor má 12 statorových elektrod rovnoměrně rozmístěných po obvodu. Rotor je tvořen 4 nastavci zajišťujícími proměnnou kapacitu při rotaci a tedy silové působení na rotor.

Rozměry mikroaktuátorů jsou v obrázcích 7,8. Základní jednotkou v těchto obrázcích je  $10^{-6}$  m.



Obrázek 7 Náhled struktury



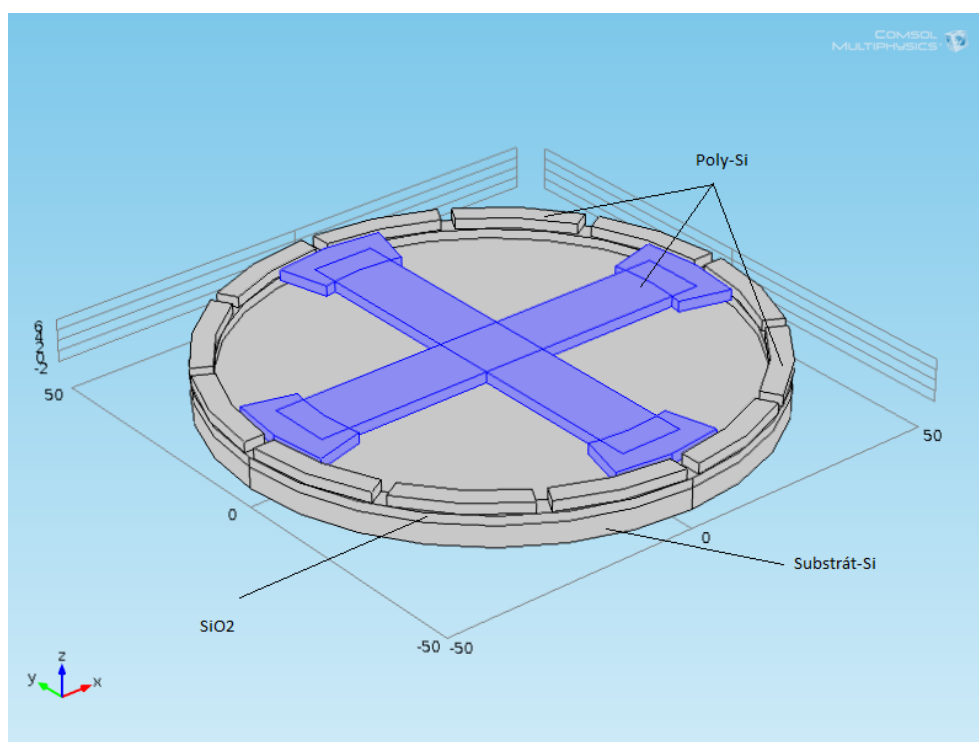
Obrázek 8 Rozměry VCM

Comsol také obsahuje rozsáhlou databázi materiálů. Pro modelovaný aktuátor přichází v úvahu několik materiálů. Jedná se o materiály na bázi křemíku. Pro šíření elektrostatického pole je nejdůležitější vlastností měrná permitivita materiálu. Ve struktuře VCM byly použity tyto materiály:

Materiál	$\epsilon_r$ (při 0°C)
SiO <sub>2</sub>	3.9
Poly-Si	4.5
Si	11.7
Vzduch	1

Tabulka 1 Tabulka relativních permitivit

Rozložení materiálu bylo zvoleno shodně jako v kapitole 1.4, Obrázek 4. Celá struktura je obklopena vzduchem do vzdálenosti o řád vyšší, než jsou rozměry aktuátoru. Statorové elektrody a rotor jsou tvořeny Poly-Si. Pro zamezení vyzkratování statorových elektrod jsou tyto elektrody umístěny na izolační vrstvě SiO<sub>2</sub>, celý aktuátor je umístěn na křemíkovém substrátu (Obrázek 9).

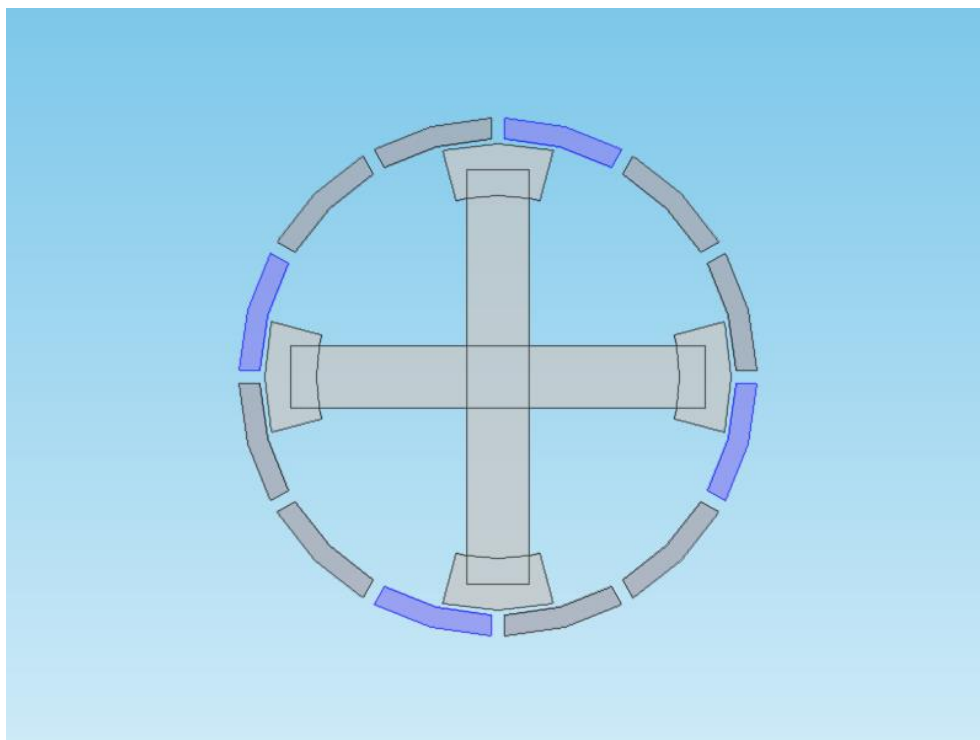


Obrázek 9 Struktura a použité materiály

## 2.2.Sestavení matematického modelu

Pro správné sestavení modelu je potřeba v Comsolu přiřadit jednotlivým rozhraním a materiálům specifické elektrické vlastnosti tak, aby bylo možné určit rozložení pole v dané oblasti.

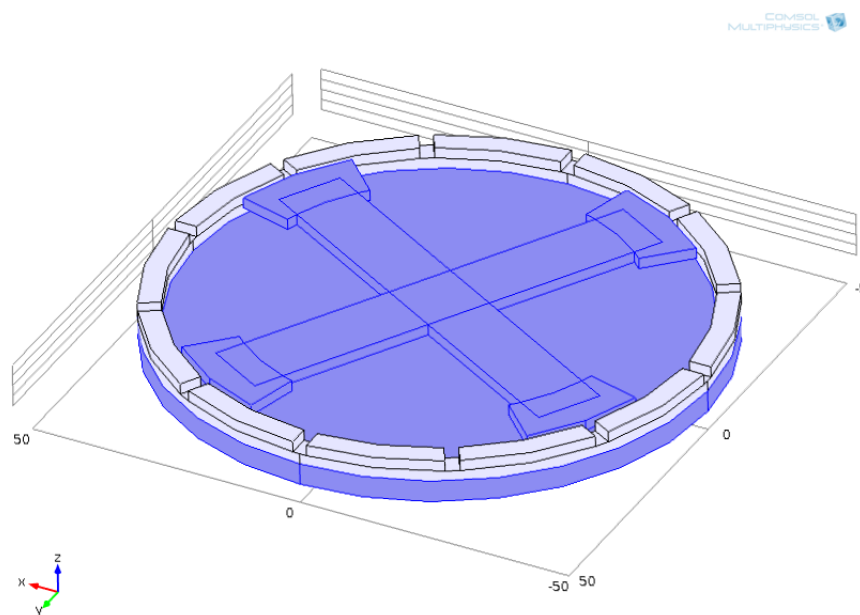
Jako první specifickou vlastnost jsme zadávali potenciál na rozhraní. Aby byl tento potenciál lépe aplikovatelný, rozdělili jsme si statorové elektrody do tří skupin, přičemž každá elektroda dané skupiny měla v jednom čase stejný potenciál. Potenciál tedy odpovídal přiloženému napětí ve voltech. Napájená skupina elektrod měla přiřazený potenciál 120V, ostatní skupiny elektrod 0 V, stejně jako rotor. Na obrázku 10 vidíme modře označenou skupinu napájených elektrod. Neoznačené části měli potenciál roven 0.



Obrázek 10 Aplikace potenciálu na rozhraní

Je také potřeba přiřazení nulového elektrického potenciálu substrátu  $S_i$  z důvodu odstranění nestability rotoru, jak bylo naznačeno v kapitole 1.4. Na obrázku 11 vidíme modře označený substrát  $S_i$  a rotor s nulovým potenciálem.



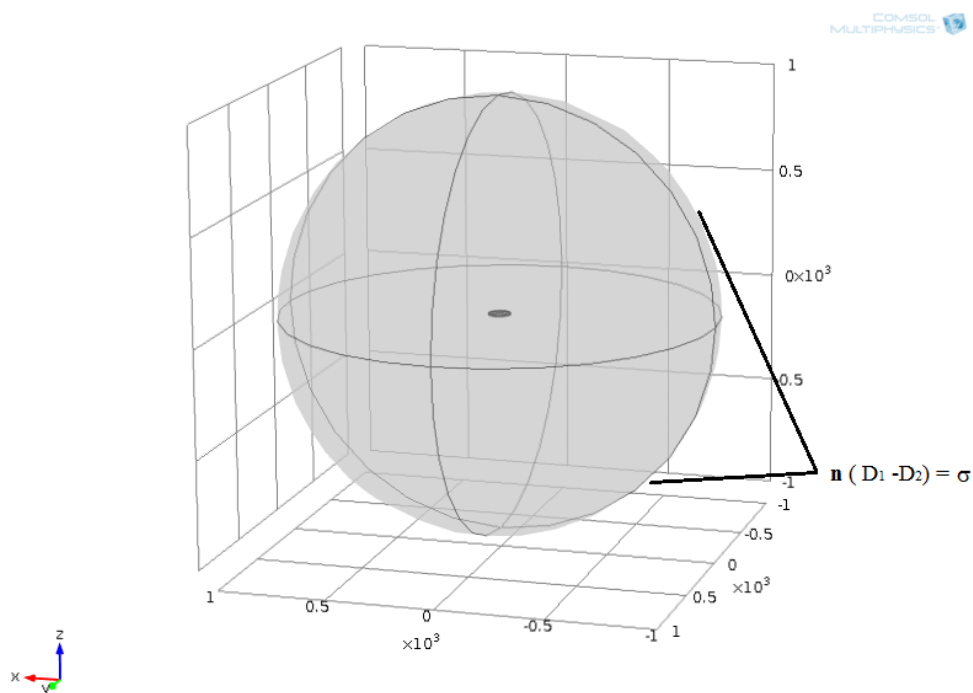


**Obrázek 11 Vodivé propojení rotoru a substrátu**

Celá struktura byla uzavřena v prostředí s poloměrem o řád vyšší, než jsou rozměry aktuátoru. Na vnější okraj prostředí ohraničujícího aktuátor byla definována podmínka nulové plošné hustoty náboje (Obrázek 12).

$$\mathbf{n} (D_1 - D_2) = \sigma, \quad (2.2)$$

kde  $\mathbf{n}$  je normálový vektor k rozhraní,  $D_1$  je elektrostatická indukce v prvním prostředí,  $D_2$  je elektrostatická indukce v druhém prostředí a  $\sigma$  je plošná hustota náboje.



Obrázek 12 Potenciál na vnějším okraji

Další elektrickou vlastností aplikovanou do struktury byly počáteční podmínky. Součástí simulace nebylo řešení přechodových elektrických a mechanických jevů, proto byly zadány počáteční podmínky odpovídající ustálenému stavu.

### 2.3. Algoritmus pro výpočet

Pro výpočet parametrů pole v metodě numerické simulace se používají Maxwellovi rovnice (MR).

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.3.1)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.3.2)$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho, \quad (2.3.3)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0, \quad (2.3.4)$$

kde  $\mathbf{H}$  je intenzita elektromagnetického pole,  $\mathbf{J}$  značí proudovou hustotu,  $\rho$  je objemová hustota náboje,  $\mathbf{E}$  značí intenzitu elektrického pole,  $\mathbf{D}$  je elektrostatická indukce a  $\mathbf{B}$  je elektromagnetická indukce.

Intenzita elektrostatického pole  $\mathbf{E}$  je základní charakteristickou veličinou popisující elektrostatické pole. Tato veličina popisuje silové působení elektrického pole. Vyjadřuje sílu, kterou působí elektrické pole na nepohyblivý jednotkový náboj, který se v tomto poli nachází.

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{Q}, \quad (2.3.5)$$

kde  $\mathbf{F}_e$  je síla způsobená elektrickým polem a  $Q$  je náboj. Pro charakterizaci elektrostatického pole ve vakuu je intenzita  $\mathbf{E}$  postačující. Pro aplikaci v látkovém prostředí zavádíme elektrostatickou indukci  $\mathbf{D}$ .

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad (2.3.6)$$

kde  $\mathbf{P}$  značí polarizaci materiálu,  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua a  $\varepsilon_r$  je permitivita prostředí. Permitivitu bychom spočetli jako:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r. \quad (2.3.7)$$

Elektrická polarizace materiálu je základní vlastností určující rozložení elektrostatického pole. Vyjadřuje schopnost materiálu přizpůsobit vnitřní rozložení náboje vnějšímu elektrickému poli tak, že dojde k mikroskopickým přesunům nosičů náboje vázaných v atomech látky a k vytvoření dipólů místo původně neutrálních atomů. Tyto dipóly se orientují ve směru vnějšího elektrického pole [6].

Pro výpočet elektrostatického pole uvažujeme III Maxwellovu rovnici:

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho, \quad (2.3.8)$$

Intenzitu elektrického pole potom můžeme spočítat jako:

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi = -\nabla \varphi, \quad (2.3.9)$$

kde  $\varphi$  značí elektrický potenciál.

Po dosazení rovnice 2.3.6 do 2.3.7 dostaneme:

$$\nabla (\varepsilon \mathbf{E}) = \rho, \quad (2.3.10)$$

Dosazením 2.3.9 do 2.3.10 :

$$\nabla \cdot (\varepsilon (-\nabla \varphi)) = \rho, \quad (2.3.11)$$

$$\Delta \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon}, \quad (2.3.12)$$

Rovnici 2.3.12 nazýváme Poissonovou rovnicí a platí ve všech regulérních bodech lineárního, homogenního dielektrika [13].

Na rozhraní mezi dvěma dielektriky neplatí MR v diferenciálním tvaru, a proto je potřeba definovat podmínky na rozhraní (viz. kapitola 2.2).

Pro síly působící uvnitř aktuátoru používáme metodu výpočtu z energie elektrostatického pole.

$$W_c = \int_V \frac{1}{2} \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} \, dV, \quad (2.3.13)$$

kde  $W_c$  značí energii elektrostatického pole,  $\mathbf{D}$  je elektrostatická indukce,  $\mathbf{E}$  je intenzita elektrostatického pole a  $V$  je objem oblasti výpočetního pole aktuátoru.

Derivací této energie ve směru otáčení rotoru bychom dostali moment působící na rotor.

$$\mathbf{M}_\alpha = - \frac{\partial W_c(U, \alpha)}{\partial \alpha} \approx \frac{W_{c2} - W_{c1}}{\Delta \alpha}, \quad (2.3.14)$$

kde  $\mathbf{M}_\alpha$  je moment a  $\alpha$  značí úhel natočení rotoru proti výchozí poloze.

V Comsolu je také možné použít k výpočtu aktuátorového tlaku tzv. Maxwellův tenzor pnutí. Tato funkce využívá pro výpočet integraci rovnice 2.3.15 podle plochy, na kterou síla působí.

$$\mathbf{n}_1 \mathbf{T}_2 = -\frac{1}{2} \mathbf{n}_1 (\mathbf{E} \mathbf{D}) + (\mathbf{n}_1 \mathbf{E}) \mathbf{D}^T \quad (2.3.15)$$

kde  $\mathbf{E}$  je intenzita elektrostatického pole,  $\mathbf{D}$  je elektrostatická indukce,  $\mathbf{n}$  je normálový vektor k ploše, na kterou síla působí. Indexy u normálového vektoru  $\mathbf{n}$  a tenzoru pnutí  $\mathbf{T}$  značí opačný směr těchto matematických operátorů. Maxwellův tenzor pnutí můžeme vyjádřit rovnicí:

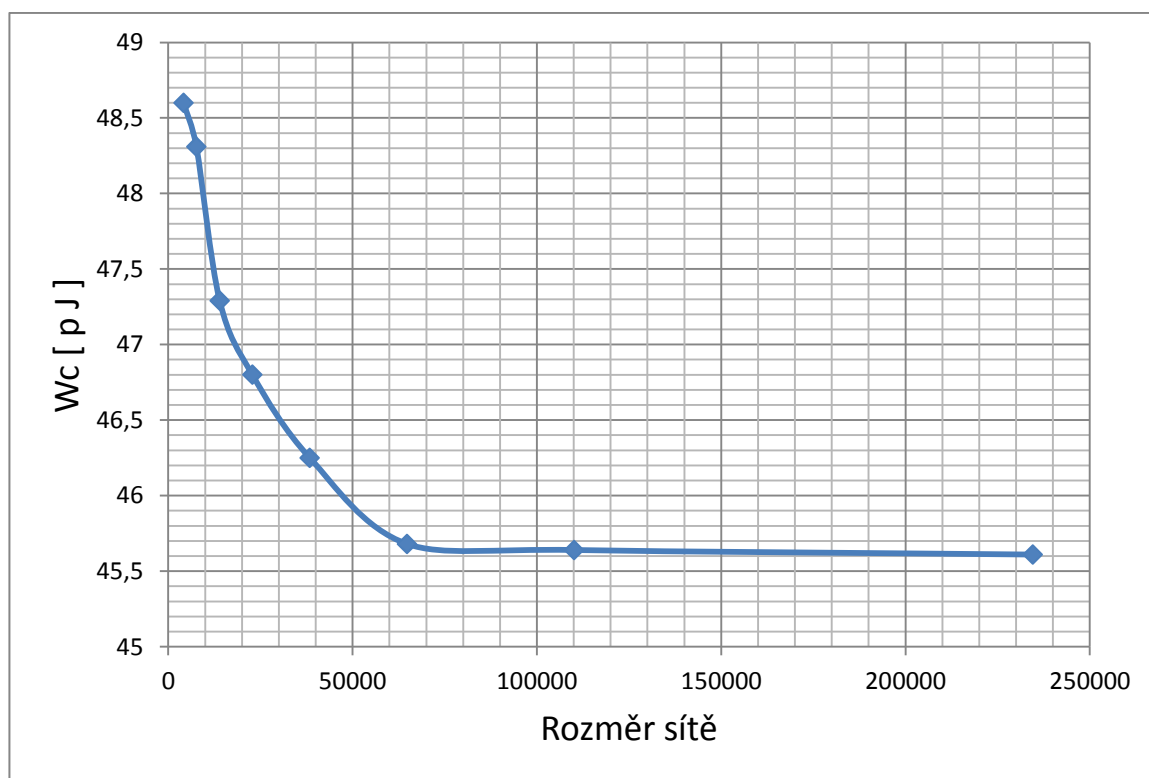
$$T_{ij} = \varepsilon_0 \left( E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right) + \frac{1}{\mu_0} \left( B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B^2 \right), \quad (2.3.16)$$

kde  $\delta$  je parametr, který vyjadřuje specifické tlakové vlastnosti tenzoru umístěné na hlavní diagonále tenzoru. Pro prvky na hlavní diagonále (tzn. prvky s indexy xx, yy, zz) je tento prvek 1, pro ostatní je nulový. Pro výpočet tenzoru pnutí v elektrostatickém poli uvažujeme pouze první část rovnice:

$$T_{ij} = \varepsilon_0 \left( E_i E_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} E^2 \right). \quad (2.3.17)$$

Tensor je matematickým operátorem, díky kterému můžeme vyjádřit působení veličiny vzhledem k rovině. Pro jednu veličinu bychom tedy dostali tenzor ve tvaru matice  $3 \times 3$ , přičemž parametry  $T_{xx}$ ,  $T_{xy}$ ,  $T_{xz}$  by vyjadřovali vektor dané veličiny vzhledem k rovině vyjádřené normálovým vektorem ve směru osy  $x$ .

Pro určení elektrostatické energie v Comsolu je zapotřebí pro danou problematiku sestavit model, určit okrajové podmínky a definovat materiály použité ve struktuře. (viz kapitola 2.2.). Po dokončení výpočtů zadáme programu rovnici 2.3.13, který z označené oblasti (v tomto případě celá struktura) určí elektrostatickou energii. Ta bude spočítána za pomoci aproximace hustoty energie na jednotlivých elementech polynomem, ze kterého integrací dostaneme výslednou energii. Změna parametrů sítě má vliv na přesnost řešení. U sítě můžeme měnit jak tvar elementů, tak jejich rozměry respektive počet uzlů pro výpočet. Množství uzlů zvyšuje požadavky na hardware výpočetní jednotky, jelikož musí být parametry pole spočítány pro každý uzel sítě.



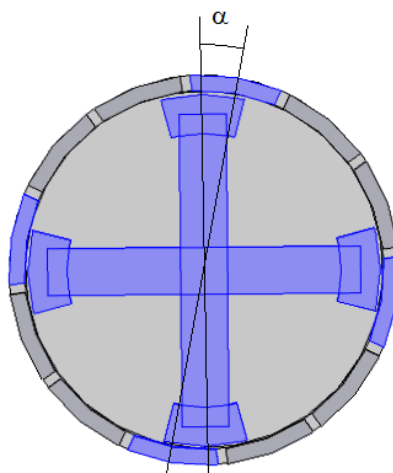
Obrázek 13 Vliv hustoty sítě na výpočet

Z obrázku 13 je zřejmé, že přesnost řešení konverguje se zvyšováním počtu elementů sítě. Pro výpočet pole byl zvolen rozměr sítě  $\sim 110\,000$  elementů. Tento rozměr zajišťoval dostatečnou přesnost a rychlost výpočtu.

### 3. Zhodnocení výsledků simulace

Zhodnocení výsledků simulace bude nejzřetelnější za pomoci grafu znázorňující rozložení elektrostatického pole, respektive rozložení elektrického potenciálu a siločar zobrazujících zakřivení pole prostorovým uspořádáním aktuátoru.

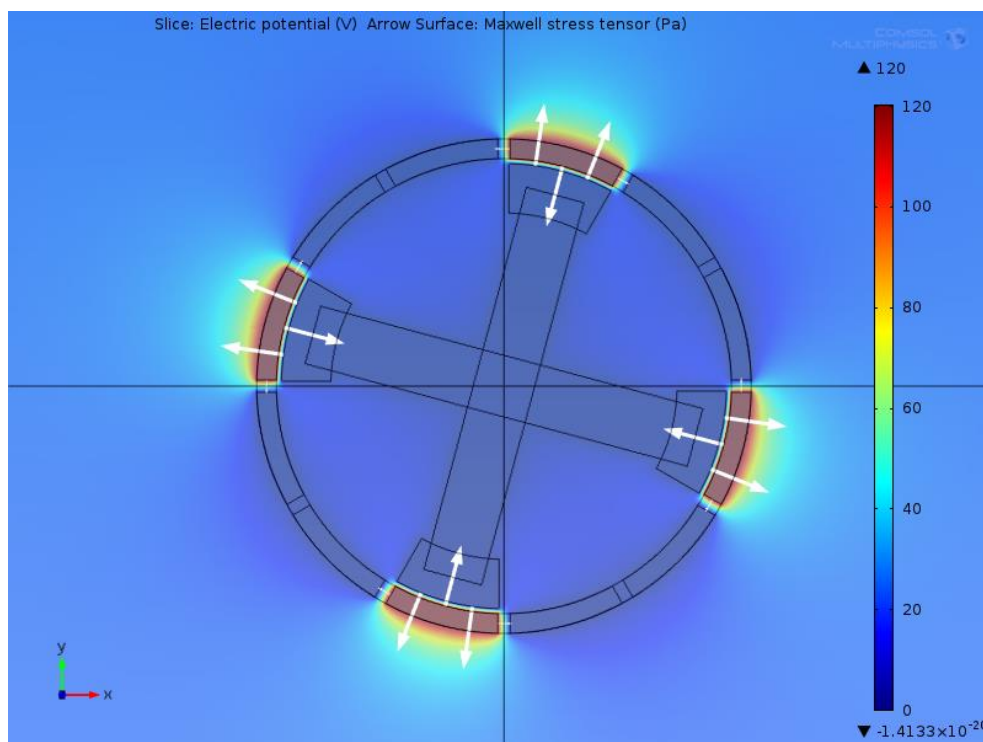
Vzájemná poloha aktivních statorových elektrod vzhledem k ose rotoru je vyjádřena jako úhel  $\alpha$  (Obrázek 14).



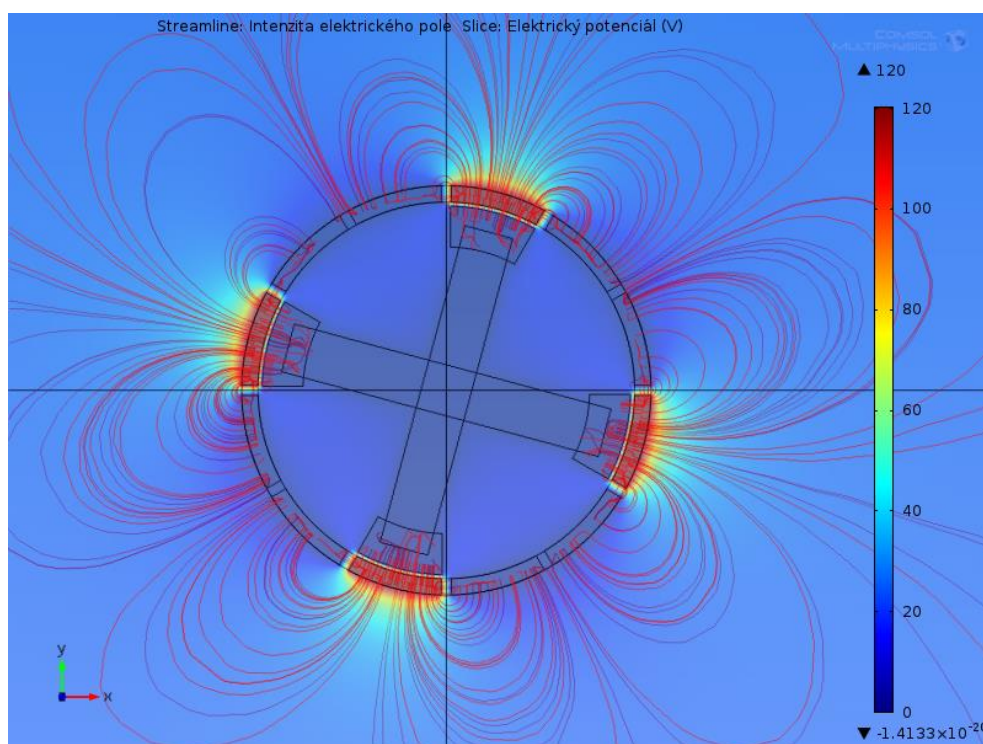
Obrázek 14 Úhel natočení

Při uvážení přepínání potenciálu jednotlivých elektrod pro docílení rotačního pohybu nenastává změna rozložení pole, pouze dojde ke skokové změně úhlu  $\alpha$ . Proto můžeme průběh změny pole v závislosti na úhlu  $\alpha$  zobrazit za pomoci jedné aktivní skupiny elektrod a změny polohy rotoru vzhledem k těmto elektrodám.

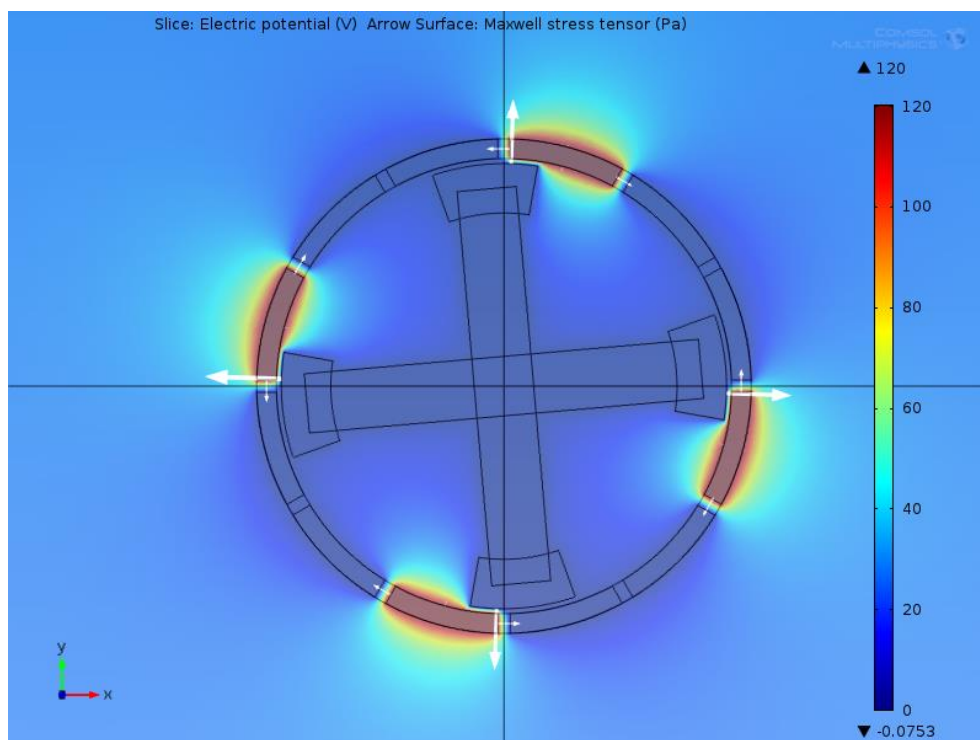
Řez pro zobrazení grafů byl umístěn do roviny rotoru. Pro ukázkou budou zobrazeny dvě různé polohy rotoru.



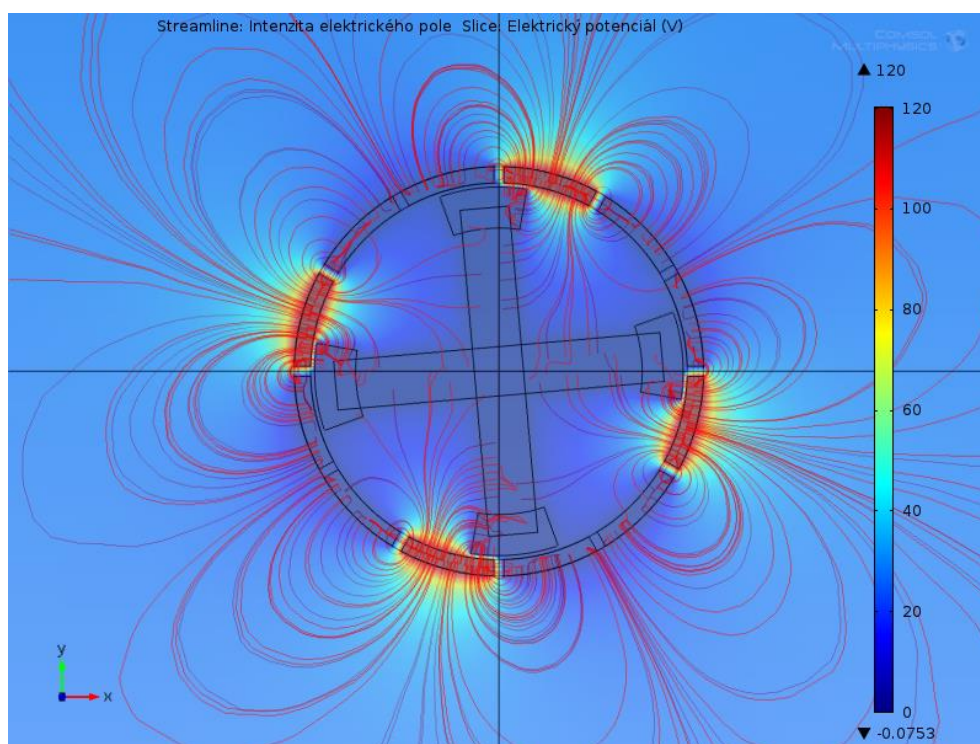
Obrázek 15 Potenciál, Maxwellův tenzor pnutí, prostorové posunutí  $0^\circ$



Obrázek 16 Potenciál, siločáry, prostorové natočení  $0^\circ$



Obrázek 17 Potenciál, Maxwellův tenzor pnutí, prostorové natočení 25°



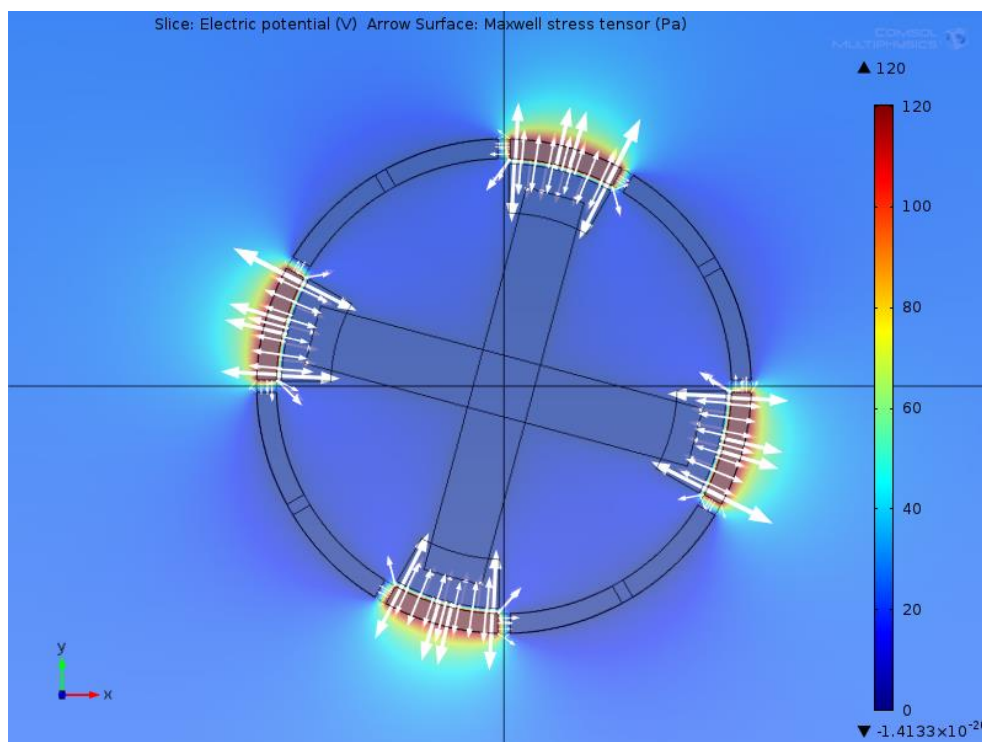
Obrázek 18 Potenciál, siločáry, prostorové natočení 25°

Z obrázků vidíme, že v modelu působil tlak na strukturu ve směru mezery mezi napájenými satorovými elektrodami a rotorem. Směr aktuátorového tlaku i jeho velikost se



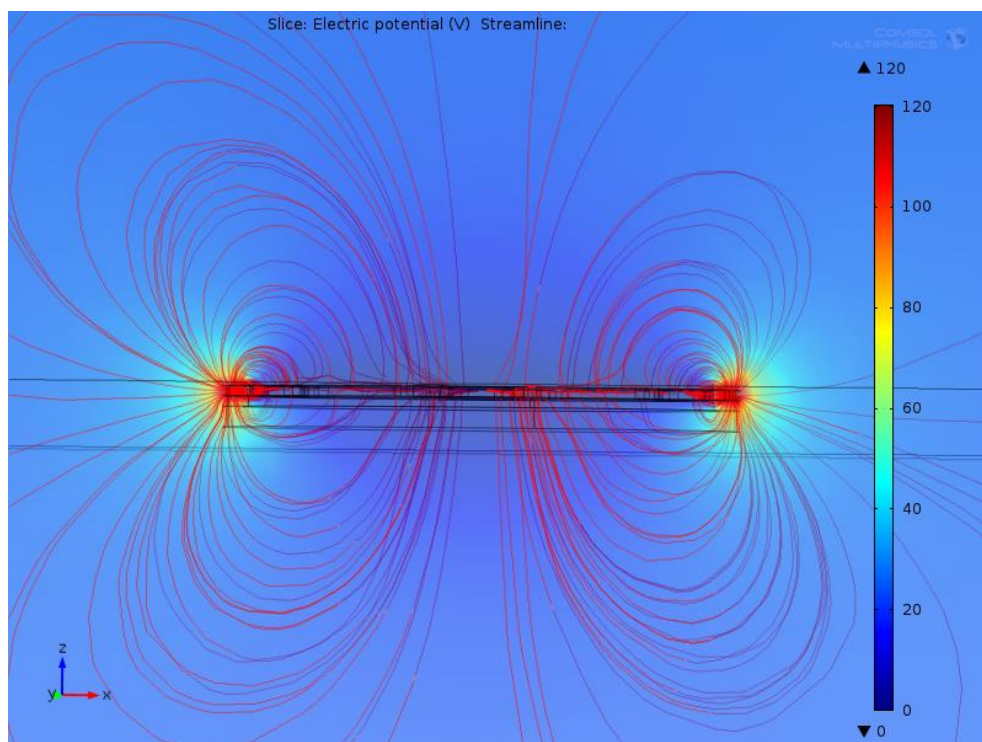
měníly v závislosti na natočení rotoru, stejně jako siločáry vyjadřující zakřivení elektrostatického pole.

Výsledný zobrazený tlak vypočtený pomocí Maxwellova tenzoru pnutí, se skládal s dílčích spočtených hodnot tlaku působící ve více bodech. Tyto dílčí hodnoty měli různou velikost i směr, jak je zobrazeno v obrázku 19.



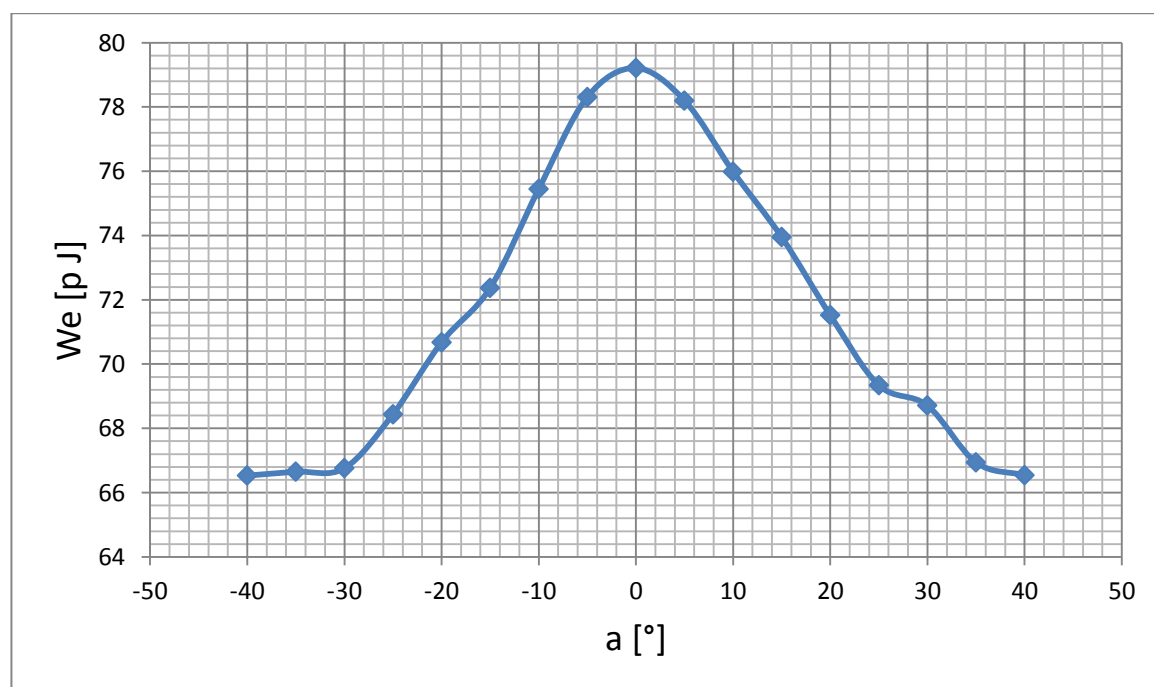
Obrázek 19 Elementy tenzoru pnutí

Díky řešení v trojdimenzionálním prostoru máme možnost pole zobrazit i v jiných rovinách než pouze v rovině rotoru. Pro zobrazení rozložení siločar v rovině kolmé na osu rotoru byla zvolena pozice prostorového srovnání rotorových a statorových elektrod ( $\alpha = 0$ ). Rozložení pole v rovině kolmé na osu rotoru vidíme v obrázku 19.



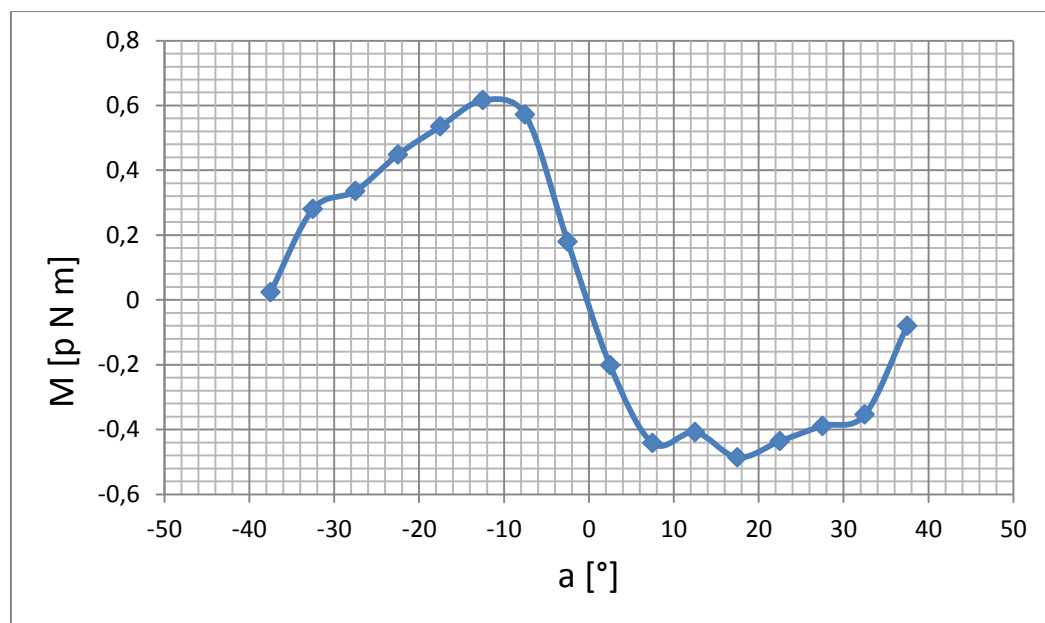
Obrázek 20 Potenciál, siločáry, prostorové natočení 0°, řez kolmý na osu rotoru

Se změnou polohy rotoru se také měnila velikost celková energie soustavy (obrázek 20).



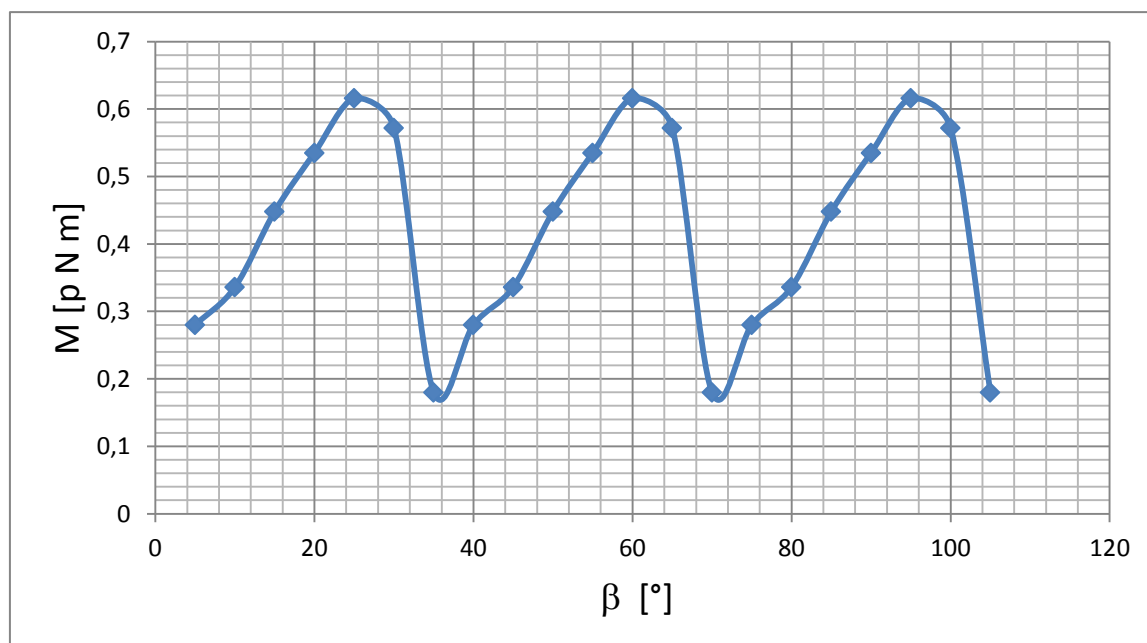
Obrázek 21 Změna energie v závislosti na poloze rotoru

Z této energie podle vztahu 2.3.14 spočteme moment aktuátoru (obrázek 21).



Obrázek 22 Závislost momentu na poloze rotoru

Jak bylo naznačeno v kapitole 1.4, VCM je mikromotorem synchronním. Pro jeho řízení potřebujeme znát polohu rotoru. Informace o poloze nám umožní určit vhodné okamžiky přepnutí napájených statorových elektrod a docílit optimálního průběhu momentu [1]. V obrázku 25 je vidět průběh momentu při sekvenčním spínání v závislosti na rotaci rotoru vyjádřené pomocí uhlů natočení rotoru ve stupních.



Obrázek 23 Průběh momentu při sekvenčním spínání

## 4. Závěr

Při určování parametrů modelovaného aktuátoru jsem vycházel z použité literatury a snažil jsem se modelovat aktuátor, který by bylo možné v reálných podmínkách zkonstruovat a který by byl funkční z hlediska elektrických principů. Výsledné zvolené uspořádání bylo převzato z patentů, tudíž jsem předpokládal jeho funkčnost. Použité materiály ve struktuře byly zvoleny na základě používaných výrobních procesů a s parametry odpovídajícími realizovatelné teplotě provozu zařízení. Při sestavování matematického modelu jsem postupoval podle rovnic použitých v programu pro výpočet tak, aby byl z uvedených vzorců zřejmý postup, kterým jsme se dopracovali k výsledným hodnotám. Nastavení jednotlivých elektrických vlastností bylo usnadněno především rozsáhlou knihovnou nápovědy. V průběhu modelování jsem byl překvapen kvalitou zpracování funkcí programu i jejich množstvím. Z prostředí je zřejmé, že se jedná o profesionální program. Nicméně pro plné pochopení všech funkcí programu, je potřeba rozsáhlý teoretický aparát a znalost numerické simulace a metody konečných prvků obecně.

Uvedené výsledky simulace se přibližovaly našim očekáváním. Z grafů je názorně vidět rozložení elektrického potenciálového pole v řezu rotoru, stejně jako působící tlak. Zakřivení elektrostatického pole je poté znázorněno siločarami. Zobrazení tří rozměrného pole pomocí řezů nám dává informaci o průběhu veličin v důležitých polorovinách, nicméně se nevyrovná trojrozměrnému interaktivnímu prostředí programu. Výsledný vypočtený moment byl poněkud nižší než v tabulce uvedené v kapitole 1.5. Tato skutečnost může být způsobena nižším napájecím napětím, než bylo použito v našem případě, stejně jako faktem, že v tabulce je uveden moment pro Top-Drive uspořádání a že byl aktuátor napájen střídavým napětím. Modelovaný aktuátor měl uspořádání elektrod Side-Drive, které obecně dosahuje nižšího momentu. V tabulce také nejsou uvedeny materiály použité ve struktuře. Spočtený moment modelovaného aktuátoru byl nižší, řádově však souhlasil s uváděnými hodnotami. Proto považuji simulaci za úspěšnou a z výsledků je vidět momentový výstup aktuátoru při konkrétních vstupních elektrických parametrech.

Problematika elektrostatického pole, jeho silového působení a aplikace poznatků do výrobků je velice rozsáhlá disciplína. Veliký pokrok zaznamenaný ve výpočetní technice společně s postupem ve výrobních technologiích naznačuje veliký potenciál tohoto vědního oboru ve spojení s možnostmi numerické simulace.

V průběhu zpracování bakalářské práce jsem se dozvěděl mnoho informací o elektrostatických aktuátorech a měl jsem možnost práce v prostředí programu Comsol Multiphysics.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] GHALICHECHIAN, Nima. *Design, fabrication, and characterization of rotary variable-capacitance micromotor supported on microball*. Maryland, 2007. Disertační práce. Univerzity of Maryland. Vedoucí práce Reza Ghodssi
- [2] HUSÁK, Miroslav. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Praha: Academia, 2008, 540 p. ISBN 80-200-1478-0.
- [3] A. KETABI a M. J. NEVRADI. Optimization Shape of Variable Capacitance Micromotor Using Differential Evolution Algorithm. [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2010/909240/>
- [4] LEONDES, Cornelius. *MEMS/NEMS: Handbook Techniques and Applications*. 1. vyd. University of California, Los Angeles, USA: Springer Science, 2006. ISBN ISBN10 0-387-24520-0.
- [5] CHANG, Jen-shih, Arnold J KELLY a Joseph M CROWLEY. *Handbook of electrostatic processes*. New York: M. Dekker, c1995, xi, 763 p. ISBN 08-247-9254-8.
- [6] Elektrostatika. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1\\_polarizace#Polarizace\\_dielektrika](http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1_polarizace#Polarizace_dielektrika)
- [7] KALTENBACHER, Manfred. *Numerical simulation of mechatronic sensors and actuators*. 2nd ed. New York: Springer, c2007, xviii, 428 p. ISBN 978-354-0713-593.
- [8] Properties of SiO2 and Si3N4 at 300K. *SiliconFarEast* [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.siliconfareast.com/sio2si3n4.htm>
- [9] HUSÁK, Miroslav. MEMS a mikrosystémové technologie. *Odborné časopisy* [online]. [cit. 2014-05-01]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=38122](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38122)
- [10] SCHIBAIKE, Narito a Shinji UCHIDA. *Electrostatic micro-motor apparatus* [patent]. USA. A, 5331236. Uděleno 7.5.1991. Zapsáno 11.6.1990. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US5013954>
- [11] HOWE, Roger, Jeffrey LANG, Martin SCHLECHT a Stephen SENTURIA. *Electrostatic micromotor* [patent]. USA. A, 4943750. Uděleno 24.7.1990. Zapsáno 3.7.1989. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US4943750>
- [12] Dielektrická pevnost: Průrazné napětí. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-24]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrick%C3%A1\\_pevnost](http://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrick%C3%A1_pevnost)
- [13] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd., přeprac. Plzeň: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2001, 357 s. ISBN 80-708-2826-9.