

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Ing. Vladimír Janíček

Autonomní napájecí zdroje pro mikrosystémy

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Elektronika

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, srpen 2011

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na katedře mikroelektroniky Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Vladimír Janíček
katedra mikroelektroniky Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel: Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
katedra mikroelektroniky
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, 166 27 Praha 6

Oponenti:

.....

.....

Teze byly rozeslány dne:

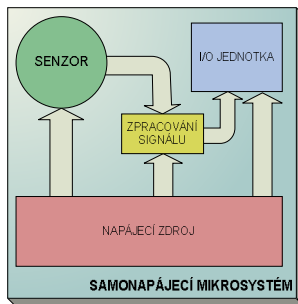
Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Elektronika v zasedací místnosti č Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Elektronika
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Vlivem velkého pokroku v současné mikroelektronice existují aplikace s velkými nároky na jednotlivé součásti aplikačního řetězce. Jedním z příkladů jsou uzly inteligentní sítě s bezdrátovými senzory, kde u každého uzlu potřebujeme maximalizovat dobu, po kterou senzor funguje a je nezávislý na přísunu energie z externího zdroje. Propojení inteligentních senzorů s podpůrnou elektronikou, obvody zajišťujícími datový transfer (data management) a napájecím zdrojem (power management) do jednoho funkčního celku lze označit jako samonapájecí mikrosystém. Jeho principiální schéma je uvedeno na obrázku 1.



Obr. 1 – Principiální schéma samonapájecího mikrosystému

Použití klasických baterií není vždy výhodné, protože vyžaduje zásah člověka pro jejich výměnu. Z tohoto důvodu je získávání elektrické energie, nutné pro provoz těchto zařízení, velkým problémem. Jednou z možností, jak napájení zajistit, je využít jiné druhy energií, které jsou dostupné v okolí napájeného zařízení. Většinou se jedná (dle způsobu nasazení) o tepelnou, světelnou nebo mechanickou energii. Získáváním elektrické energie z vnějšího prostředí je možno pokrýt požadavky na energii po celou dobu životnosti napájeného zařízení. Proces získávání energie z okolního prostředí přeměnou na spotřebitelnou elektrickou energii je obecně známý jako energy harvesting – ve volném překladu „sklizení energie“. V české literatuře se zařízení, využívající principů sběru energie, většinou označují jako energetické generátory. Klasifikaci elektronických zařízení pro sběr energie lze provést podle několika hledisek. Jedním z nich je dělení dle formy energie, která se používá jako vstupní primární (sbíraná). Obsahem práce je návrh a optimalizace elektrostatického generátoru. Elektrostatické generátory jsou založeny na principu časové změny kapacity kondenzátoru v závislosti

na mechanických vibracích. Vlivem vibrací se mění vzájemná vzdálenost nabitých desek kondenzátoru. Elektrostatické generátory jsou mechanická zařízení, která vyrábějí elektřinu pomocí použití mechanické síly, kdy získaná energie odpovídá vynaložené práci na oddálení desek kondenzátoru, které jsou drženy při sobě elektrostatickou silou. Roundy a kol. v [1] dělí elektrostatické generátory do tří typů dle směru pohybu obou elektrod kondenzátoru. Různé elektrostatické generátory odpovídající tomuto dělení jsou popsány v několika článcích [2-6]. Práce od Arakawa a kol. [7], Peano a kol. [8] a Sterken a kol. [9, 10] popisují elektrostatické generátory využívající elektretů. Významnou výhodou použití elektrostatického generátoru je jeho schopnost jednoduché integrace za pomoci standardních výrobních technologií mikroelektroniky. Naproti tomu pro svou činnost vyžadují další zdroj napětí, kterým se kondenzátor musí periodicky nabíjet. Všechny výše uvedené práce vykazují určitá omezení a to hlavně vysoké rezonanční frekvence mechanických struktur kondenzátorů, provoz pouze v jedné ose a v mnoha případech nemožnost jednoduché integrace za pomoci standardních technologií MEMS. Navrhovaný generátor byl řešen za podpory projektu GAČR (GA102/06/1624-MINASES), výzkumného záměru (MSM6840770014) a projektu Ministerstva vnitra ČR (VG20102015015) „Miniaturní inteligentní analyzační systém koncentrací plynů a škodlivých látek, zejména toxických“, kde je řešená problematika součástí napájecího zdroje autonomního mobilního zařízení pro analýzu koncentrace plynů a nebezpečných látek s multisenzorovým variabilním uspořádáním a bezdrátovým přenosem informací. Část projektu, na které se podílím, řeší problematiku napájecí části zařízení, která v sobě zahrnuje i jednotku využívající „energy harvesting“ generátor.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem práce je návrh, simulace vlastností, optimalizace, výroba, charakterizace a ověření vlastností elektromechanické struktury MEMS elektrostatického generátoru schopného pracovat při nízkých rezonančních (modálních) frekvencích ve 3D pracovním režimu. Následující seznam popisuje jednotlivé úkoly, řešené v mé disertační práci:

- *Návrh topologie elektrostatického generátoru pracujícího při nízkých rezonančních frekvencích*
- *Optimalizace topologie pro práci ve 3D režimu*
- *Modelování a simulace elektromechanických vlastností struktury*

(mechanické napětí, kapacita, modální frekvence, deformace)

- *Příprava výrobních podkladů, zajištění kompatibility s výrobním procesem*
- *Minimalizace mechanického napětí uvnitř struktury při současném zachování nízkých rezonančních frekvencí*
- *Ochrana struktury před poškozením při vysokých výchylkách budicí energie*
- *Definice dosažitelných výchylek a citlivosti struktury na jednotlivé budicí frekvence*
- *Charakterizace vyrobeného prototypu*
- *Porovnání simulovaných výsledků s naměřenými hodnotami, definování příčin odchylek naměřených a simulovaných hodnot*

Vyrobený laboratorní vzorek elektrostatického generátoru je optimalizován tak, aby dosahoval pokud možno maximálních výchylek své vnitřní elektrody a s tím spojené energetické výtěžnosti v co nejširším kmitočtovém pásmu. Z tohoto důvodu a pro účely zvýšení výtěžnosti konverze energií je topologie generátoru navrhována pro práci ve všech 3 osách kartézského osového systému. Elektromechanické simulace, návrhy a dílčí úpravy topologií jsou řešeny pomocí specializovaného softwaru pro návrh a simulaci MEMS struktur CoventorWare®.

Hlavními přínosy práce jsou:

- *Návrh topologie MEMS elektrostatického generátoru pro samonapájecí mikrosystém*
- *Závěs formou postupně zalamovaného nosníku (nové použití)*
- *Optimalizace topologie pro širokopásmové využití - (navržený překryv frekvencí není nikde publikován)*
- *Velmi nízké budicí frekvenci mechanické struktury při zachování velmi dobrého poměru frekvence k ploše čipu (100 Hz při 3,5 mm) - (publikovány hodnoty o dva řády vyšší při stejné ploše čipu) [1]*
- *Optimalizace topologie pro 3D režim (prozatím není nikde publikováno)*

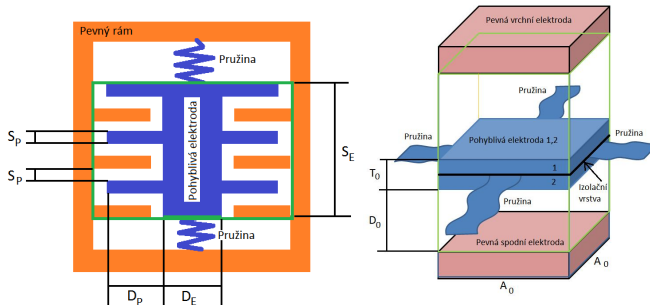
3. METODY ZPRACOVÁNÍ

Struktura vycházející částečně ze základní nosníkové struktury je navržena a modelována jako třírozměrný systém MEMS na bázi křemíku. Hlavním úkolem je optimalizovat rozměry struktury vzhledem k dostupné výrobní technologii, optimalizovat samotnou geometrie struktury s přihlédnutím k prostředí, ve kterém bude generátor používán a ze kterého bude získávat budící energii. Oproti již publikovaným výsledkům předpokládáme práci ve všech 3 osách kartézského systému. Další dílčí úkoly zahrnují tvorbu simulace elektromechanických a elektrických vlastností struktury, popis 2D a 3D modelu, tvorbu diskretizační sítě a simulace chování struktury v různých pracovních módech a fázích činnosti. Po ověření chování struktury v simulacích je dalším úkolem příprava výrobních podkladů v souladu s předpisy uvedenými v tzv. design kitu dodaného výrobcem technologie, provedení kontrol správnosti návrhu a finální příprava výrobních podkladů. Vyrobený prototyp byl otestován, byly změřeny jeho elektrické a mechanické vlastnosti a tyto porovnány s nasimulovanými hodnotami. Z komplexního posouzení dosažených výsledků je možno usuzovat na možné úpravy navržené struktury pro její další optimalizaci a přizpůsobení aplikačnímu určení.

4. VÝSLEDKY

Návrh topologií a jejich modely

Aby bylo možné určit mechanismus, který dosahuje nejlepší energetické hustoty, bylo navrženo několik topologií, jejichž principiální schémata jsou uvedena na obrázku 2. Každý návrh topologie obsahuje jednu pohyblivou a jednu, případně více pevných elektrod. Na obrázcích je rovněž zelenou čarou vyhrazen region, na který bude normalizována získaná energie. Tato oblast je vybrána proto, že hlavně v těchto regionech dochází k aktivní přeměně energie. V literatuře je možno najít zmínky o pasivaci ploch obou elektrod tenkou vrstvou (100 nm) nitridu křemíku (Si_3N_4) tak, aby elektrody při běžném provozu nemohly přijít do kontaktu s ostatními částmi zařízení, což vcelku zajišťuje bezpečnost i spolehlivost provozu a také tím dochází ke zvýšení efektivity a výkonu. Pro naše výpočty počítáme s prací ve vakuu, kde nedochází ke vlivu okolního vzduchu hlavně ve formě tlumení pohybu elektrod vlivem průtoku vzduchu mezi elektrodami. Zároveň je možno dosáhnout maximální hodnoty kapacity C_{MAX} i při vzájemném fyzickém dotyku elektrod.



Obr. 2 – Modely generátorů (tloušťka prstů elektrod T_E)

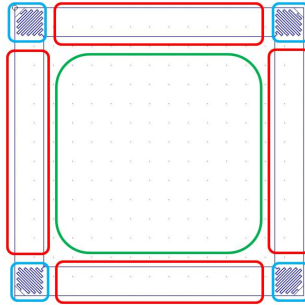
Vhodný návrh 3D modelu je klíčový pro úspěšnost simulací. Model obsahuje všechny důležité prvky, které mají vliv na charakteristické vlastnosti struktury. Na druhou stranu není možno zachytit všechny detaily struktury, protože by vzniklý model vedl k tak složité struktuře, která by při simulacích vedla k velmi dlouhým simulačním časům. Proto je nutno některé díly struktury zjednodušit nebo přímo zanedbat.

Navrhovaná struktura a její topologie vychází z následujících požadavků:

- *Co nejnižší rezonanční frekvence struktury*
- *Minimální rozměry*
- *Schopnost práce ve 3D*
- *Ochrana struktury proti poškození při silných vibracích*
- *Realizovatelnost v komerční výrobní technologii*

Celkovou topologii elektrostatického generátoru lze rozdělit na několik částí (viz obrázek 3):

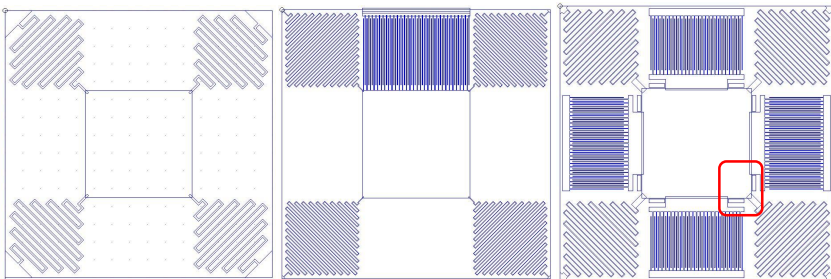
- pohyblivá prstová elektroda (spojená s centrálním závažím) – zelená oblast
- pevná/é prstové elektrody – červená oblast
- pružinové závěsy – modrá oblast



Obr. 3 – Základní topologie kondenzátorové struktury

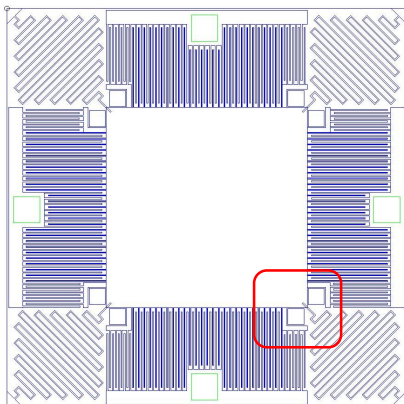
Zatímco prvním dvěma částem je věnována pozornost jen z pohledu jejich společné plochy z důvodu maximalizace plošné kapacitní hustoty, je třetí část poněkud zanedbávána a přitom na vlastnostech pružinových závěsů závisí mnoho parametrů výsledného generátoru. Obecným cílem při návrhu topologie pružinových závěsů je jejich minimální plocha a tuhost, která ovlivňuje polohu, vzájemnou vzdálenost rezonančních (modálních) kmitočtů a velikost amplitudy (přímo úměrné velikosti změny vzájemné kapacity mezi elektrodami) pohybu.

Postupnou iterací simulovaných hodnot navržených topologií s požadavky a zadáním práce bylo dosaženo optimalizované podoby topologie kondenzátorové struktury (viz obrázek 4). V následujícím textu se budu věnovat postupně jednotlivým verzím návrhu kondenzátorové MEMS struktury elektrostatického generátoru. Vždy budeme vycházet ze čtvercové struktury v obou osách symetrické, která se skládá ze tří výše uvedených základních částí.



Obr. 4 – Topologie L2(a), L3(b) a L4(c)

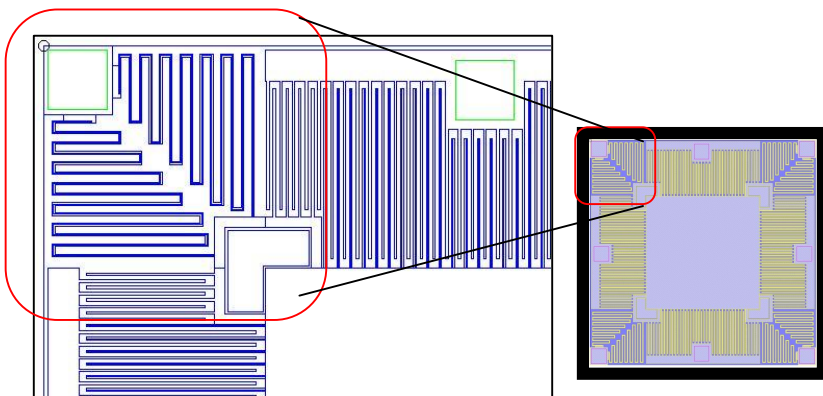
Obrázek 4a,b ukazuje topologie L2 a L3, které se liší jemností pružinových závěsů, což má dobrý vliv na snížení vlastní frekvence. Zároveň s tím je na obrázku znázorněna i jedna kompletní sada prstové struktury pevné a pohyblivé elektrody. Závěs je kotven mezi rohem rámu (FRAME) a rohem čtvercového útvaru tvořícího část pohyblivé elektrody. Obrázek 4c znázorňuje topologii L4, která již obsahuje kompletní sadu obou typů elektrod, kompromisně (dle technologie) upravené pružinové závěsy a poprvé také mechanické dorazy (zvýrazněno červeně), omezující amplitudu mechanické výchylky z důvodu zabránění možného mechanického poškození struktury a zkratu mezi elektrodami.



Obr. 5 – Topologie L5

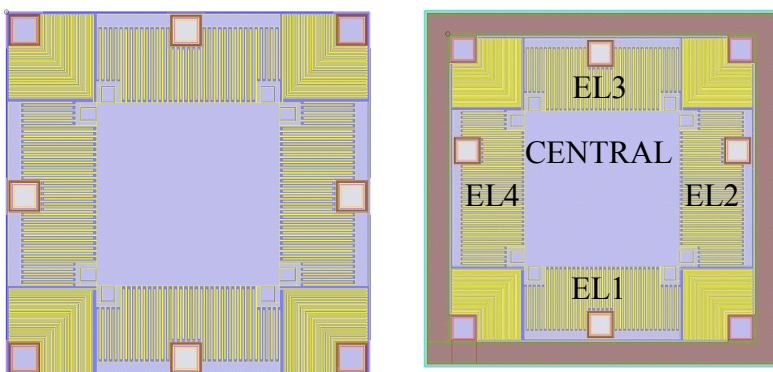
Topologie L5 (obrázek 5) přináší opravenou strukturu mechanických dorazů (zvýrazněno), které fungují ve 2D režimu, kdy mechanický pohyb ve směru jedné osy je omezován nyní 6 kusy mechanických dorazů zároveň, u předchozího typu to byly jenom 4 kusy. Dosáhneme tím lepší stability a vystředění pohybu pohyblivé elektrody. Dále došlo ke změně v poměru ploch prstové struktury kondenzátorů vůči ploše pružinových závěsů ku prospěchu kondenzátorů, což vedlo ke zvýšení celkové kapacity. V prostoru pevných elektrod jsou umístěny plošky kontaktních plošek (označeno zeleně).

V topologii L6 (obrázek 6) došlo k modifikaci jednoho z rohů struktury a to v oblasti pružinového závěsu, jelikož předchozí typ L5 vykazoval nevhodné mechanické chování a vysokou tuhost, což vedlo k omezení funkčnosti struktury při nízkých frekvencích. Navržená topologie pružinového závěsu v 6. verzi je rozdělena na dva nezávislé pružinové útvary, které tlumí mechanické kmity jen v určitém směru (vektoru). Tím pádem dochází ke zmenšení lokálního namáhání a jeho rozložení na dvě nosíkové struktury.



Obr. 6 – Topologie L6 a L7 (vpravo dole)

Další změna byla provedena v oblasti mechanického dorazu, kde došlo ke sloučení dvou sousedících dorazů do jednoho a jeho uzavření do kroužkovitého útvaru s napojením jednoho konce pružinového závěsu. Výsledky simulací všech 4 nových závěsů (L7) ukázaly očekávaný pokles vlastní frekvence oproti topologii L5. Ovšem právě oblast úchyty závěsu formou tenkého pásku obepínajícího mechanický doraz vykazoval lokální maximum mechanického pnutí, což vedlo k vytvoření další verze. Na obrázku 7 je znázorněna verze L8, která se oproti předchozím variantám liší ve tvaru pružinových závěsů, které jsou tvořeny pravidelně se opakující zalamovanou strukturou nosníkového typu. Díky tomu mohlo být dosaženo takového zavěšení struktury, které je mechanicky ekvivalentní se zavěšením na nosník o velké délce, ovšem na podstatně menší efektivní ploše.

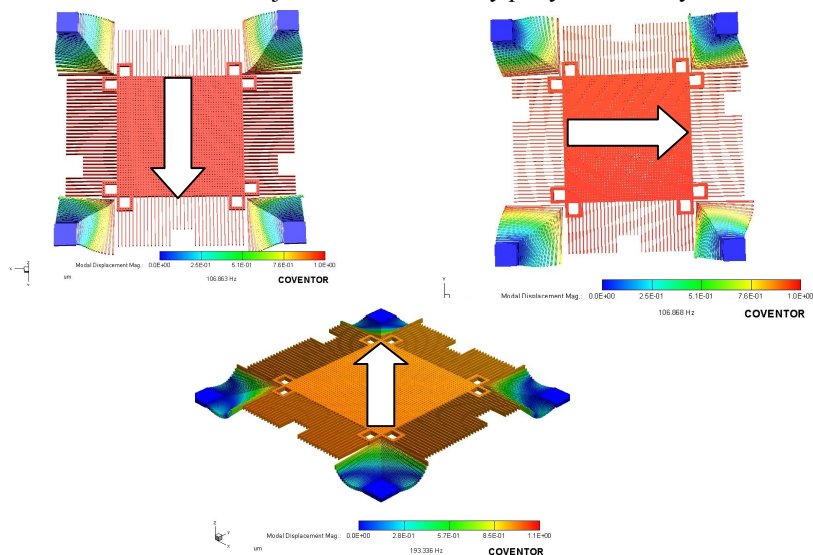


Obr. 7 – Topologie L8 a L9

Z technologického důvodu bylo ještě před finalizací návrhu nutno do topologie zpracovat změnu polohy dvou kontaktních plošek na pevné elektrody, které bylo nutné přesunout v jedné ose od středu struktury. Vlivem nesymetrického úchyty pružinových závěsů k pohyblivé elektrodě bylo dosaženo velmi malého rozdílu mezi 1. a 2. vlastní frekvencí struktury. V případě jemných oscilací v blízkosti 1. a 2. vlastní frekvence dochází k plynulému přechodu jednoho typu konverzního mechanismu do druhého což vede ke zvýšení efektivity a výtěžnosti konverzního cyklu. Na obrázku 7 je zobrazena finální topologie L9, která byla poslána do výroby a byla předlohou pro simulace.

Modální analýza – hledání vlastních frekvencí

Modální analýzou je možno získat přirozené rezonanční (vlastní) frekvence mechanické soustavy v rovnováze. Na těchto vlastních frekvencích reaguje mechanicky netlumená (bezeztrátová) soustava na vnější ohraničené buzení pohybem s neomezenou výchylkou. Jinými slovy, přenosová funkce soustavy se stává v těchto bodech nekonečnou. Tyto kmitočty ukazují reakce soustavy velmi podobné reakcím tlumeného mechanického systému a ukazují, kdy soustava dosáhne maximální reakce (mechanického pohybu) na vnější buzení. Obrázek 8 ukazuje deformace a směry pohybu struktury.



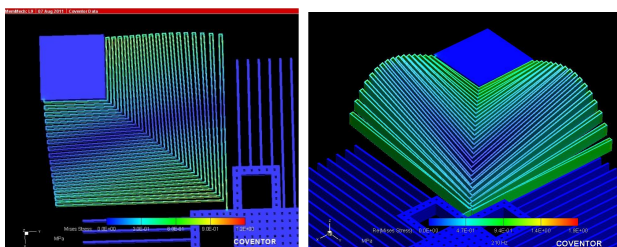
Obr. 8 – Ukázka mechanické deformace a směru pohybu na 1., 2. a 3. vlastní frekvenci

U navržené topologie bylo dosaženo těchto vlastních frekvencí (Tab.1):

Tab.1 – Vlastní frekvence struktury

Vlastní frekvence	Hodnota (Hz)
1.	106,683
2.	106,868
3.	193,336
4.	214,256

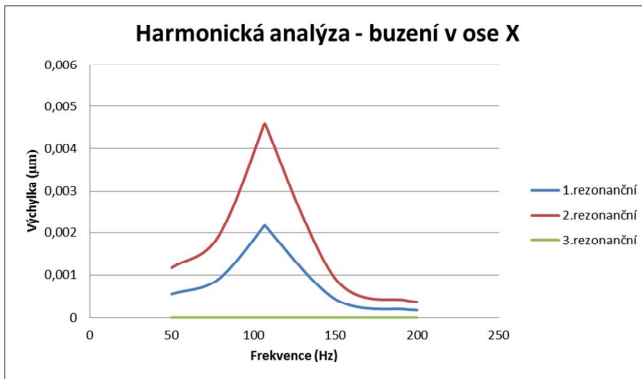
Důležitým aspektem návrhu je sledování mechanických napětí, ke kterým ve struktuře dochází vlivem působících mechanických kmitů. Jako každá pevná látka vykazuje i křemík vnitřní mechanické pnutí (stress), které v případě mechanických excitací velkých amplitud může vést k překročení meze kluzu a případně permanentní deformaci struktury. Tomuto hraničnímu bodu se v návrhu snažíme vyhnout a během simulací je nutné sledovat i tyto hodnoty. Obvyklý způsob zavěšení kondenzátorových struktur v publikovaných zdrojích vychází z topologie jednoduchého můstku z jedné strany pevně fixovaného k rámu čipu (frame) a na druhé straně napojeného na pohyblivou elektrodu. Po vystavení generátoru mechanickým vibracím se vlivem setrvačnosti hmoty, která je tvořena pohyblivou elektrodou, mechanická soustava rozkmitá. Maximální výchylka sestavy záleží na frekvenci kmitů mechanického buzení, celkové hmotnosti, mechanických vlastnostech materiálu a topologii. S hmotností dochází obecně ke snižování vlastních frekvencí a zvyšuje se výchylka. Ovšem s tím také přímou úměrou stoupá velikost mechanického pnutí uvnitř závěsů (obrázek 9). Správně navržený závěs vykazuje minimální mechanickou tuhost mezi místem úchyty k vnějšímu rámu a místem spoje s pohyblivou elektrodou. Současně ovšem musí být schopen kmitat v co nejširším rozsahu poloh a zároveň na sobě rovnoměrně rozložit mechanické pnutí přímo úměrné míře rozkmitu.



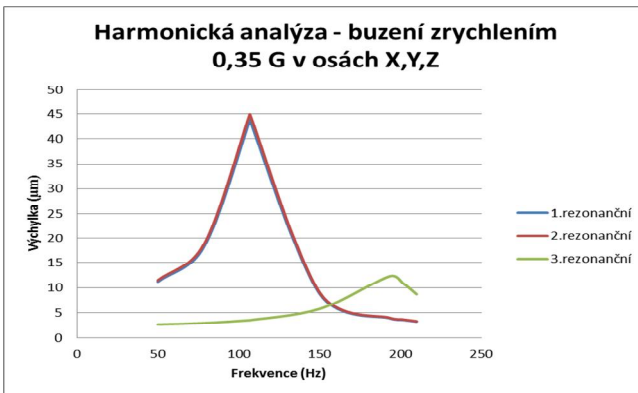
Obr.9 – Mechanické napětí uvnitř pružiny

Harmonická analýza

Pomocí harmonické analýzy chceme najít dynamickou odezvu systému při použití harmonicky proměnné zátěže. Typicky se jedná o buzení struktury silou v určitém směru (vektoru), případně je možné sledovat odezvu struktury na zrychlení definované velikostí a směrem. Na obrázku 10 je zobrazena mechanická odezva struktury na silový podnět ve směru osy X rovnoběžné s plochou generátoru. Na grafu jsou dobře patrné výchylky související s 1. a 2. rezonanční frekvencí, kdy struktura dosahuje výchylek větších, než tomu je u 3. rezonanční frekvence. Tento jev je obecně znám a je způsoben setrvačností hmoty, která při vyšších frekvencích kmitů začíná působit jako tlumící aspekt a celkovou výchylku snižuje. Z grafu je patrná odezva struktury ve všech 3 směrech osového systému. Systém pracuje ve 3D režimu.

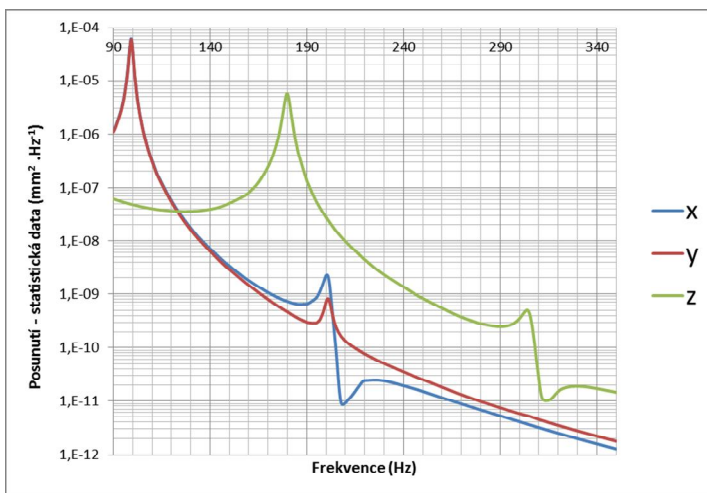


Obr. 10 – Buzení struktury periodickým silovým pulsem ve směru osy X



Obr. 11 - Buzení struktury zrychlením o 0,35 G ve všech směrech současně

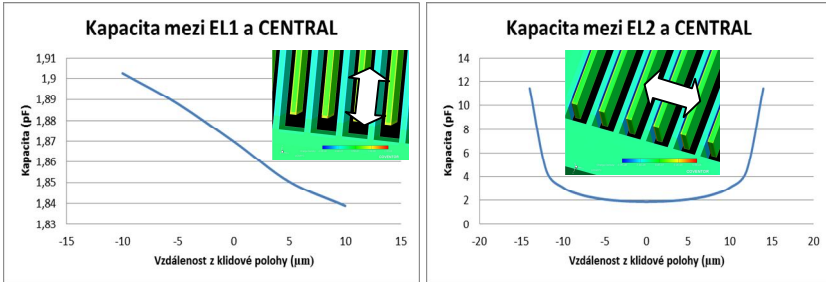
Na obrázku 11 je zobrazena mechanická odezva struktury na buzení způsobené zrychlením ve všech 3 osách o velikosti 0,35 G. Tento způsob již nezavádí chybu ovlivnění struktury směrem buzení, jak tomu bylo u obrázku 10, jelikož jej lze pokládat za všesměrové. Z grafu na obrázku 11 je patrný nárůst vlivu 3. rezonanční frekvence a takřka shodné hodnoty a výchylky kmitů struktury při dosažení 1. a 2. vlastní frekvence. Obrázek 12 zobrazuje statistickou studii mechanické odezvy struktury na buzení náhodnými periodickými kmity ve všech třech osách kartézských souřadnic. Na svislé ose je uvedena míra výkmitu v osách X, Y a Z. Na vodorovné ose je frekvence v Hz. Na frekvence 106 Hz (1. a 2. vlastní frekvence) vykazuje struktura pohyb v obou směrech X a Y. Jsou zde tedy lokální maxima obou křivek X (modrá) a Y (červená). Třetí vlastní frekvence 193 Hz vykazuje hlavní pohyb v ose Z, což naznačuje lokální maximum zelené křivky. Další, 4. vlastní frekvence, při níž struktura vykazuje otáčivý pohyb kolem osy Z, je vidět na vzniku lokálních maxim obou křivek X a Y. 5. vlastní frekvence na 305 Hz vykazuje opět hlavně pohyb v ose Z. Struktura vykonává kolíbatý pohyb kolem osy rovnoběžné s osou X. Zajímavé je na grafu sledovat vznik lokálních minim u 4. a 5. vlastní frekvence, která jsou ekvivalentem stojatého vlnění určité části struktury způsobené symetričností pohybu kolem osy, příp. bodu, který se nachází uvnitř tělesa struktury.



Obr. 12 - Buzení náhodnými kmity ve všech třech osách s konstantním statistickým rozložením od 90 Hz do 350 Hz o úrovni akcelerace $3500 (mm \cdot s^{-2})^2 \cdot Hz^{-1}$

Kapacita mezi elektrodami a klidový stav

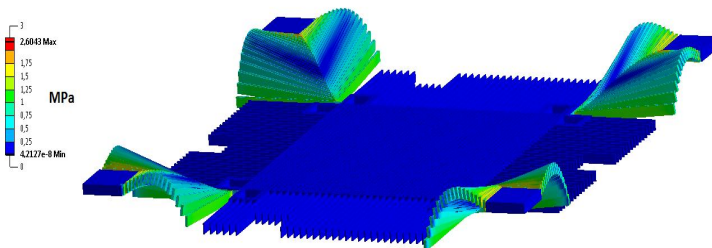
Cílem návrhu bylo dosáhnout co největší změny kapacity mezi pevnými a pohyblivou elektrodou při pohybu z jednoho limitního stavu do druhého. Při buzení v ploše generátoru se sada elektrod EL1(EL3)-CENTRAL pohybuje ve směru své osy a EL2(EL4)-CENTRAL se pohybují kolmo na osu pohybu (elektrody se přibližují). Z grafů na obrázku 13 je patrný směr pohybu i poměr změny kapacity $C_{MAX}/C_{MIN} = 6$ (EL2) a 1,03 (EL1).



Obr. 13 - Změna kapacity kondenzátoru ELx-CENTRAL

Poměr změny kapacit odpovídá teoretickým předpokladům, kdy topologie In-Plane Gap Closing vykazuje 1000x větší energetickou hustotu (s tím související změnu kapacity), než topologie In-Plane Overlap.

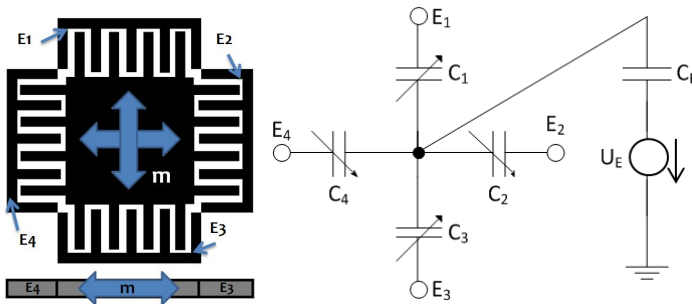
Z hlediska mechanických stresů je také důležité znát přesné poměry uvnitř struktury v případě, kdy zařízení není vystaveno mechanickým vibracím a na strukturu působí pouze gravitační přitažlivost. Na obrázku 14 je znázorněn tvar struktury pohyblivé elektrody v klidu (měřítko v ose Z je pro ilustraci zvětšeno 30x). Detail mechanického napětí v pružině v klidu je podobný jako na obrázku 9.



Obr. 14 – Prověšení struktury v klidu – rozložení mechanického napětí

Náhradní model

Jedním z klíčových problémů celého návrhu je volba vhodného druhu napěťového zdroje (bias), který zajišťuje nabití kondenzátoru na začátku každého konverzního cyklu. Návrh, který tomuto principu odpovídá, využívá jako interní zdroj elektrického napětí např. elektrety. Principiální návrh mechanického a ekvivalentního elektrického modelu generátoru s elektrety je uveden na obrázku 15.

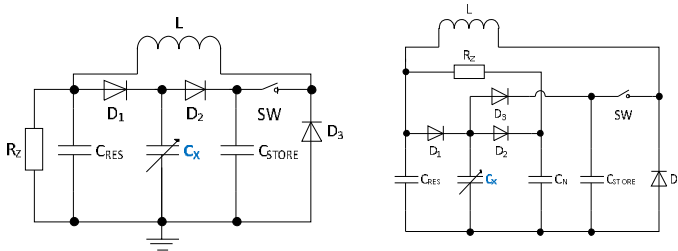


Obr. 15 – Ekvivalentní náhradní mechanický a elektrický model kondenzátorové struktury

Ve schématu náhradního elektrického modelu na obrázku 15 je elektret reprezentován zdrojem napětí U_E v sérii s kondenzátorem C_E . Aby bylo možné simulovat elektrické chování a celkový výkon a efektivitu generátoru, je nutno navrhnout zjednodušený model se soustředěnými prvky. Z důvodu symetrie struktury je možno generátor rozdělit na dva paralelně zapojené lineární generátory, jejichž směr pohybu je si vzájemně kolmý. V tomto případě neuvažujeme pohyb v ose Z. Jeden dílčí generátor je tvořen pohyblivou střední elektrodou a pevnými elektrodami E1 a E3. Druhý generátor je tvořen opět pohyblivou elektrodou a pevnými elektrodami E2 a E4. Toto zjednodušení nám snížilo celkový počet mechanických stupňů volnosti o jeden, což zjednoduší další výpočty. Navržený ekvivalentní model je tedy založen na jednom mechanickém stupni volnosti (dáno pozicí střední čtvercové části) a dvěma elektrickými stupni volnosti (náboje na proměnných kondenzátorech).

Řídicí obvody

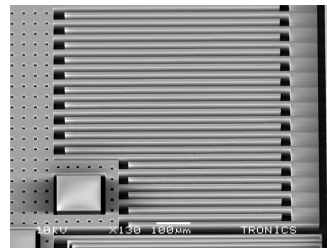
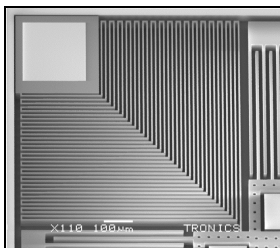
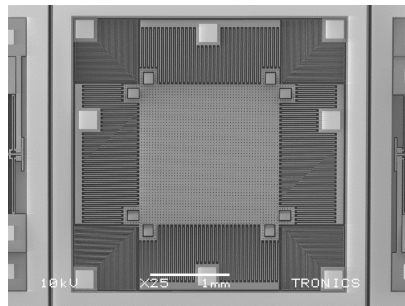
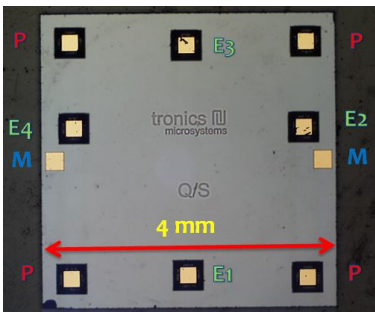
Zapojení na obrázku 16 se skládá z kondenzátoru s prstovými elektrodami, nábojové pumpy a flyback obvodu, jehož funkce je založena na kladné zpětné vazbě mezi výstupem a vstupem. Flyback obvod je aktivní pouze pro kompenzaci ztrát způsobených svodovými proudy, což má za následek velmi nízkou frekvenci spínání, což vede ke snížení ztrát.



Obr. 16- Řídicí obvody (vpravo upravená verze)

Realizace

Navržený generátor byl vyroben (obrázek 17) ve formě laboratorního vzorku v technologii SOI H.A.R.M. 60 μm firmy TRONICS®.



Obr.17- Vyrobený laboratorní vzorek

Měření

V tabulce 2 jsou shrnuty statické parametry struktury dle návrhu v CoventorWare®.

Tab. 2 – Statické parametry struktury generátoru

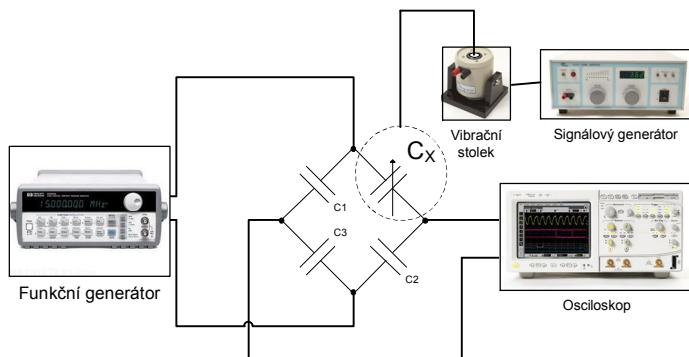
	Hodnota
Rozměr celého čipu	4 mm x 4 mm x 0,812 mm
Objem celého čipu	12,992 mm ³
Hmotnost celého čipu	18,647 μg
Rozměr vnitřní struktury	3,44 mm x 3,44 mm
Šířka prstové elektrody	10 μm
Typická délka prstové elektrody	700 μm
Šířka pružinového závěsu (nosníku)	5 μm
Max. výkmit omezený dorazem	10 μm
Klidová mezera mezi elektrodami	15 μm
Hmotnost pohyblivé elektrody	1,5453758 μg
Poloha těžiště pohyblivé elektrody (osa X)	1750 μm (vůči ploše elektrody)
Poloha těžiště pohyblivé elektrody (osa Y)	1746 μm (vůči ploše elektrody)
Poloha těžiště pohyblivé elektrody (osa Z)	32 μm (vůči ploše elektrody)

Navržený čip byl realizován, avšak nepodařilo se do odevzdání práce získat od dodavatele SPECTRUM-SEMI zapouzdřené čipy, které by umožnily provést elektrická měření pro porovnání se simulovanými výsledky. Předpokládám dodávku zapouzdřených čipů v září 2011. Následně proběhnou plánovaná měření, porovnání a vyhodnocení výsledků tak, že budou kompletně k dispozici při obhajobě práce.

Pro ověření výsledků simulací budou provedena následující měření:

Měření vlastních frekvencí struktury (obrázek 18) v zapojení generátoru v kapacitním můstku při buzení periodickým signálem z funkčního generátoru.

Průběh výstupního signálu generátoru umístěného na vibračním stolku se mění dle mechanických vibrací, jejichž frekvence a amplituda jsou řízeny signálovým generátorem, je zobrazován na osciloskopu. Při měření budou vyhledávána lokální maxima (špičky napětí) výstupního signálu můstku způsobené velkými změnami kapacity proměnného kondenzátoru v rezonančních frekvencích. Měření proběhne na vyváženém kapacitním můstku, kde jeden kondenzátor je tvořen pevnou a pohyblivou elektrodou generátoru. Dle vybrané elektrody (orientace prstové elektrody ve směru kmitů nebo kolmo na kmitů) lze určit vliv změny kapacity v obou pracovních módech (konstantního napětí nebo náboje). Vzájemná poloha čipu a směru kmitů bude měněna pro měření ve všech třech osách

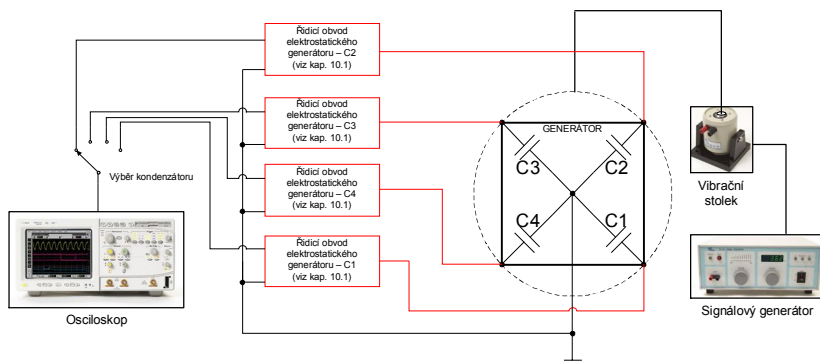


Obr. 18 – Měřicí řetězec pro charakterizaci vlastností elektrostatického generátoru

Měření hodnoty C_{MIN} a C_{MAX} na jednotlivých rezonančních (vlastních) frekvencích. Schéma zapojení na obrázku 18. Při silném buzení vibračního stolku na vlastních frekvencích bude provedeno měření výstupního napětí. Ze znalosti frekvence buzení, vstupního napětí a kapacitance bude určena hodnota minimální a maximální kapacity jedné prstové struktury.

Linearita odezvy generátoru na amplitudu budících mechanických vibrací. Schéma zapojení na obrázku 18. Při postupném zvyšování velikosti amplitudy budících vibrací bude pozorována linearita průběhu změny výstupního napětí. Očekáváme lineární průběh až do dosažení takových mechanických vibrací, jejichž maximální výchylka začne být omezoována zabudovanými mechanickými dorazy uvnitř struktury.

Ověření funkce generátoru - kondenzátorová struktura zapojena dle obrázku 19. Měření bude provedeno na struktuře buzené vibracemi postupně na 1. ,2. a 3. vlastní frekvenci při maximální amplitudě mechanických vibrací. Výstupní napěťové špičky odpovídají práci vykonané generátorem vlivem mechanických vibrací.



Obr. 19 – Měřicí řetězec pro ověření funkce generátoru

5. ZÁVĚR

Předložená práce se zabývá návrhem topologií, jejich optimalizací, vytvářením modelů a simulací struktury MEMS elektrostatického generátoru. Struktura vychází z možností realizace v komerčně dostupných křemíkových technologiích poskytovaných v rámci projektů MPW sdružením EURO PRACTICE. Pro popisovanou aplikaci bylo využito technologie TRONICS. 2D modely navržených topologií společně s popisem materiálových vlastností a technologických kroků bylo využito k tvorbě 3D modelů a jejich simulaci elektromechanických a elektrických vlastností. U jednotlivých návrhů bylo provedeno několik dílčích iterací a pomocí výsledků simulací docházelo k postupnému zlepšování vlastností navrhované struktury. Cílem bloku těchto prací bylo nalezení nízkých vlastních frekvencí při dosažení rovnoměrného rozložení šířky pásma použitelných vstupních mechanických budících signálů. Lokální problémy typu překročení mechanického napětí uvnitř struktury bylo nutné řešit změnou topologie, což ve zpětné vazbě vedlo k negativnímu ovlivnění požadovaných parametrů. Tento problém se vyskytoval často v místech uchycení pružinového závěsu k rámu (FRAME) nebo k pohyblivé elektrodě, kdy docházelo ke vzniku

lokálních maxim a možnosti mechanického poškození závěsu při silných vibracích.

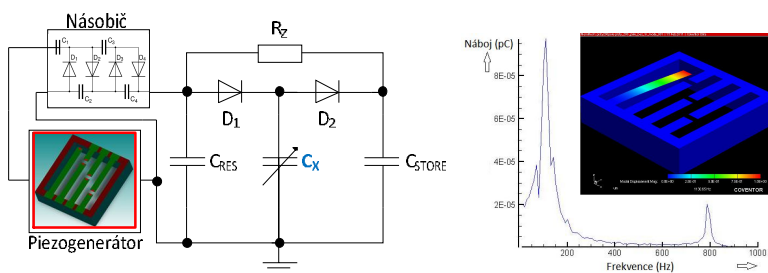
Finální návrh splňuje všechny vstupní požadavky. Struktura vykazuje nízké vlastní frekvence díky použití speciálního pružinového závěsu ve tvaru dlouhého zalamovaného nosníku, který při shodné ekvivalentní délce dosahuje stejných mechanických parametrů při podstatně menší délce mezi konci úchyty, čímž podstatně zjednodušuje možnosti integrace na malou plochu čipu. Rozdělení pružinového závěsu na dva svazky u topologie L7 a s tím spojené zdvojení počtu úchytných bodů bohužel vedlo k opětovnému zvýšení vlastních frekvencí vlivem vyšší tuhosti 2 závěsů. Stejně tak uchycení na části struktury obepínající mechanické dorazy vedla jen k částečnému přerozdělení mechanického napětí. Optimalizovaná finální topologie L9 dosahuje hodnoty 1. vlastní frekvence 106,862 Hz, což je kmitočet, který se v průmyslovém prostředí vyskytuje poměrně často jako např. brum dvoucestného usměrňovače. Druhá vlastní frekvence je díky nesymetrickému kotvení plovoucí elektrody k pružinovému závěsu jen o 0,005 Hz výše, tzn. 106,867 Hz. Tento malý rozdíl umožňuje plynulé přecházení mezi dvěma konverzními mechanismy, kdy vždy 2 pevné elektrody z celkových 4 pracují v jiném módu než ostatní dvě a tento stav se plynule mění s oscilujícími frekvencemi. V případě plné symetričnosti a shodných vlastních frekvencí by k tomu docházet nemohlo a oba jevy by se vzájemně potlačovaly. Celá struktura je jednoduše přeladitelná (směrem k vyšším frekvencím) na libovolnou vlastní frekvenci pouze úpravou tuhosti pružinových závěsů. Pokud by bylo požadováno dosahovat nižších vlastních frekvencí než u stávajícího návrhu, bylo by již nutné buď zvětšit plochu pružin na úkor kapacitní prstové struktury, což by vedlo ke snížení poskytovaného výkonu, nebo je možno na plochu střední elektrody umístit mikrozávaží, ovšem tento krok je poněkud technologicky komplikovaný a vedl by k omezení pohybu v jedné z os vlivem prověšení plovoucí elektrody způsobené gravitační přitažlivostí. Mechanicky málo tuhý pružinový závěs zároveň umožňuje pohyb plovoucí pohyblivé elektrody ve 3 osách a zvyšuje efektivitu celého generátoru o 33 % oproti obecně publikovaným 2D elektrostatickým generátorům.

Z výsledků simulací bylo možno určit výstupní výkon navržené struktury. Při napájení generátoru 24 V, budicí frekvenci kmitů 106 Hz bylo u generátoru tvořeného proměnným kondenzátorem EL2-CENTRAL při maximální výchylce 14 μm dosaženo výstupního výkonu 152 nW. Kondenzátor pracoval v módu In-Plane Gap Closing. Jelikož kondenzátor EL4-CENTRAL pracuje ve stejném módu, je získaný výkon z něj také stejný. Při současném zapojení

kondenzátoru EL1-CENTRAL (pracující v módu In-Plane Overlap) byl při stejné vlastní frekvenci generován výkon 890 pW, stejně tak jako u protilehlého kondenzátoru EL3-CENTRAL. Tyto výsledky potvrzují teoretické předpoklady o poměru výkonů obou topologií.

... a výhled do budoucna

Na obrázku 20 je uvedeno principiální schéma bloku autonomního zdroje využívajícího na místě budicího zdroje napětí piezoelektrický generátor tvořený polem několika laděných nosíkových můstků, které mají shodnou rezonanční frekvenci s vlastními frekvencemi elektrostatického generátoru. Tato struktura je součástí dalšího vývoje a bude využívat navržený laboratorní vzorek elektrostatického generátoru.



Obr. 20 – Návrh komplexního autonomního zdroje s piezoelektrickým a elektrostatickým generátorem a jeho rezonanční charakteristika

Seznam v tezích použité literatury

- [1] Roundy S, Wright P and Pister K, “Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters,” Proceedings, IMECE, 2002, pp 1–10.
- [2] Meninger S, Mur-Miranda J, Lang J, Chandrakasan A, Slocum A, Schmidt M and Amirtharajah R, “Vibration to electric energy conversion,” IEEE Trans Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 2001, v 9, pp 64–76.
- [3] Miyazaki M, Tanaka H, Ono G, Nagano T, Ohkubo N, Kawahara T and Yano K, “Electric-energy generation using variable-capacitive resonator for power-free LSI: efficiency analysis and fundamental experiment,” ISLPED, 2003, pp 193–198.
- [4] Roundy S J, “Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion,” Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, 2003.
- [5] Tashiro R, Kabei N, Katayama K, Tsuboi F and Tsuchiya K, “Development of an electrostatic generator for a cardiac pacemaker that harnesses the ventricular wall motion,” Journal on Artificial Organs, 2002, pp 239–245.
- [6] Tashiro R, Kabei N, Katayama K, Ishizuka Y, Tsuboi F and Tsuchiya K, “Development of an electrostatic generator that harnesses the motion of a living body,” JSME International Journal Series C, 2000, c 43, pp 916–922.
- [7] Arakawa Y, Suzuki Y and Kasagi N, “Micro seismic power generator using electret polymer film,” Power MEMS Conference, Kyoto, Japan, 2004, pp 187–190.
- [8] Peano F and Tambosso T, “Design and optimisation of a MEMS electret-based capacitive energy scavenger,” Journal of Microelectromechanical Systems, 2005, v 14, pp 435–529.
- [9] Sterken T, Baert K, Puers R and Borghs S “Power extraction from ambient vibration,” Proceedings of 3rd Workshop on Semiconductor Sensors and Actuators, November 2002, pp 680–683.
- [10] Sterken T, Fiorini P, Baert K, Borghs G and Puers R, “Novel design and fabrication of a MEMS electrostatic vibration scavenger,” Power MEMS Conference, Kyoto, Japan, 2004, pp 18–21.

Seznam prací disertanta vztahujících se k disertaci

Impaktovaný časopis:

- [1] Janíček, V. - Husák, M.: Fabrication of Scalable Energy Harvester. Radioengineering Journal, Brno: VUT v Brně, předpokládaný tisk 03/2012[v přípravě]. 0,312 (IF2009) [80%]
- [2] Janíček, V. - Husák, M.: Self Powered Microsystem with Electromechanical Generator. WSEAS Transactions on Electronics. 2006, vol. 3, no. 4, p. 204-209. ISSN 1109-9445. 0,03 (SJ2011) [80%]

Odborný recenzovaný časopis:

- [3] Janíček, V. - Husák, M.: Zdroje elektrické energie pro mikrosystémy. Slaboproudý obzor. 2011, roč. 67, č. 1, s. 6-11. ISSN 0037-668X. [80%]
- [4] Janíček, V. - Husák, M.: Resonant Structures For Energy Microgenerator. ElectroScope [online]. 2009, vol. 2009, no. 11, Internet: http://147.228.94.30/index.php?option=com_content&task=view&id=178&Itemid=1. ISSN 1802-4564. [80%]
- [5] Janíček, V. - Husák, M.: Autonomní senzorový mikrosystém s mikrogenerátorem. Slaboproudý obzor. 2008, roč. 64, č. 3-4, s. 38-42. ISSN 0037-668X. [80%]

Konference:

- [6] Janíček, V. - Husák, M.: Fabrication of Scalable Energy Harvester. In Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2011 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2011, vol. 1, p. 204-210. ISBN 978-80-214-4303-7. [80%]
- [7] Janíček, V. - Husák, M.: Polymer Based Piezoelectric Microgenerator. In International Conference on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ'10 [CD-ROM]. Vigo: Universidad de Vigo, 2010, vol. 1, p. 1-6. ISBN 978-84-613-7543-1. [80%]
- [8] Janíček, V. - Husák, M.: Wide Range Layout Optimization of Energy Microgenerator. In Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2010 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEI, 2010, vol. 1, p. 115-120. ISBN 978-80-214-4138-5. [80%]

- [9] Janíček, V. - Husák, M.: Resonant Energy Generator for Self-Powered Microsystem. In New Energy Solutions In Tours 2009 - Talks [CD-ROM]. Tours: ST Microelectronics Tours, 2009, vol. 1, p. 1-4. [80%]
- [10] Janíček, V. - Husák, M.: Resonant Structures for Energy Microgenerator. In Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2009 Proceedings. Brno: VUT v Brně, FEI, 2009, vol. 1, p. 192-196. ISBN 978-80-214-3933-7. [80%]
- [11] Janíček, V. - Husák, M.: Embedded Microsystem with Polymer Pressure Sensor. In MIPRO 2008 - Proceedings Vol. 1 MEET & GVS. Zagreb: Croatian Society SMFE, 2008, vol. 1, p. 125-128. ISBN 978-953-233-036-6. [80%]
- [12] Janíček, V. - Husák, M.: Autonomous Polymer Pressure Sensor. In Electronics Devices and Systems Proceedings. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008, p. 172-181. ISBN 978-80-214-3717-3. [80%]
- [13] Janíček, V. - Husák, M. - Jakovenko, J. - Suchánek, P.: PVDF Self Powered Microsystem. In ICOE International Conference on Organic Electronics 2007. Eindhoven: PHILIPS, 2007, vol. 1, p. 46-47. [80%]
- [14] Janíček, V. - Husák, M.: Autonomous power supply for smart sensors. In Moderní metody řešení, návrhu a aplikace elektronických obvodů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007, p. 35-39. ISBN 978-80-214-3535-3. [80%]
- [15] Janíček, V. - Husák, M.: Self-powered microsystem with PVDF based microgenerator. In Proceeding of the 40th International Symposium on Microelectronics (IMAPS 2007) [CD-ROM]. Washington, DC: IMAPS, 2007, vol. 1, p. 953-957. ISBN 0-930815-82-3. [80%]
- [16] Janíček, V. - Husák, M.: Self-powered microsystem with PVDF based microgenerator. In 6th Electronic Circuit and Systems Conference Proceedings. Bratislava: STU v Bratislave, 2007, vol. 1, p. 43-47. ISBN 978-80-227-2697-9. [80%]
- [17] Janíček, V. - Husák, M.: Self powered microsystem with electromechanical generator. In Proceedings of the WSEAS International Conference: 5th WSEAS Int.Conf. on MICROELECTRONICS, NANOELECTRONICS,

OPTOELECTRONICS (MINO'06) [CD-ROM]. Athens: WSEAS Press, 2006, p. 204-209. ISBN 960-8457-42-4. [80%]

- [18] Janíček, V. - Husák, M.: Electric energy harvesting inside self powered microsystem. In The Sixth International Conference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems. Bratislava: Slovak University of Technology, 2006, vol. 1, p. 271-274. ISBN 1-4244-0396-0. [80%]

Ohlasy a citace

Ohlasy nebo citace mi nejsou známy

SUMMARY

This PhD thesis discusses the design of an electrostatic generator, power supply component of the self-powered microsystem, which is able to provide enough energy to power smart sensor chains or if necessary also other electronic monitoring devices. One of the requirements for this analyzer is the mobility, so designing the power supply expects use of an alternative way of getting electricity to power the device, rather than rely on periodic supply of external energy in the form of charging batteries, etc. In this case the most suitable method to use is so-called energy harvesting – a way how to gather energy. This uses the principle of non-electric conversion of energy into electrical energy in the form of converters.

The present study describes the topology design of such structures of electrostatic generator. Structure is designed and modeled as a three-dimensional silicon based MEMS. Innovative approach involving the achievement of very low resonant frequency of the structure, while the minimum area of the chip, the ability to work in all 3 axes of coordinate system and ability to be tuned to reach desired parameters proves promising directions of possible further development of this issue. The work includes simulation of electro-mechanical and electrical properties of the structure, description of its behavior in different operating modes and phases of activity. Simulation results were compared with measured values of the produced prototype chip. These results can suggest possible modifications to the proposed structure for further optimization and application environment adaptation.

The proposed generator has been supported by several grants and projects (GA102/06/1624, MSM6840770014, VG20102015015).

My personal part of work includes principle and topology design of an electrostatic generator and its optimization, modeling and simulation of electromechanical properties of the structure, preparation of production data and ensuring compatibility with the manufacturing process, prototype characterization and comparison of simulated results with measured values.