
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 2612R011 – Elektronické informační a řídicí systémy

Srovnání vlastností obvodů pro energy-harvesting pomocí piezoelektrických měničů

Comparative study of energy-harvesting circuits for piezoelectric transducers

Bakalářská práce

Autor:	Tomáš Černý
Vedoucí práce:	Ing. Jan Václavík
Konzultant:	doc. Ing. Pavel Mokrý, Ph.D.

V Liberci 27. 5. 2009

Zde bude vloženo zadání!

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Václavíkovi za rady, připomínky a čas, který mé práci věnoval. Také bych chtěl poděkovat doc. Ing. Pavlu Mokrému, Ph.D. za poskytnuté konzultace.

A chtěl bych také poděkovat svým rodičům a celé rodině za podporu při studiu.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou piezo energy harvesting s využitím zapojení elektronických obvodů. Jsou zde navrženy a popsány 3 obvody, které také byly laboratorně odzkoušeny. V práci je u každé metody udělán závěr z naměřených hodnot a jsou zde popsány optimální podmínky účinnosti. Také je zde na začátku obecně rozebrána problematika piezoelektriny a chování bimorfu. V závěru práce je zhodnocení výsledků všech zkoumaných metod a na základě poznatků navrhnutá vylepšení stávajících obvodů.

Abstract

Bachelor study covering the problems of piezo energy harvesting with utilize electronic circuits connections. Study propose and describe three (3) electric circuits which were tested at laboratory also. Study include conclusions of each method gained from readings also define optimal conditions of efficiency. Earlier the study generally analyzed further problems piezoelectricity and performance of bimorpf. Conclusion of study include results-evaluation of all researched methods and based on this findings suggest improvement current circuits.

Seznam obrázků:	8
Seznam grafů:	9
1 Úvod	10
2 Piezoharvesting	11
3 Fyzikální podstata a úvod do problematiky piezoelektřiny	13
3.1 Vysvětlení piezoelektrického jevu	13
3.2 Piezoelektrické látky	13
3.2.1 Piezoelektrické kompozitní struktury používané v energy-harvestingu	14
3.2.2 Piezoelektrický bimorf	14
3.5 Fyzikální podstata piezoelektrického jevu	16
4 Obvod s můstkovým usměrňovačem	18
4.1 Naměřené hodnoty	19
4.2 Zhodnocení metody	21
5 Metoda SSHI	23
5.1 Vysvětlení metody SSHI	23
5.2 Zapojení metody SSHI	26
5.3 Metoda SSHI realizována pomocí MOSFET tranzistorů	27
5.4 Naměřené hodnoty	30
5.5 Metoda SSHI realizována pomocí ADG411 switche	32
5.5.1 Obecný princip switche	32
5.5.2 Popis a parametry switche ADG412	32
5.5.3 Pripojení switche ADG412 do obvodu	33
5.6 Naměřené hodnoty	34
5.7 Zhodnocení metody SSHI	35
6 Metoda Step-Up měniče	37

6.1 Vysvětlení metody.....	37
6.2 Realizování metody.....	38
6.2 Naměřené hodnoty	39
6.3 Zhodnocení metody.....	40
7 Shrnutí.....	42
8 Závěr.....	44
9 Seznam použité literatury.....	46

Seznam obrázků:

Obr. 1. Druhy bimorfů.....	15
Obr. 2. Obrázek bimorfu upevněného ve vibrátoru.....	15
Obr. 3. Základní struktura piezo-generátoru	17
Obr. 4. Zapojení s můstkovým usměrňovačem	18
Obr. 5. SSHI metoda	24
Obr. 6. SSHI metoda (časový průběh signálu).....	24
Obr. 7. Schéma zapojení SSHI metody	26
Obr. 8. Schéma MOSFETU, typ BS170	28
Obr. 9. Fungující zapojení metody SSHI pomocí mosfetů	29
Obr. 10. Funkční blokový diagram ADG412.....	32
Obr. 11. Schéma metody SSHI pomocí integrovaného obvodu ADG412.....	33
Obr. 12. Schéma metody Step-Up měniče	37
Obr. 13. Elektronické schéma zapojení metody Step-Up měniče.....	38

Seznam grafů:

Graf 1 – Průběh výkonu pro zátěž $38,4\text{ k}\Omega$	19
Graf 2 – Srovnání výkonů pro různé zátěže R_z	20
Graf 3 – 3D rozložení výkonu v závislosti na odporu R_z a frekvenci	21
Graf 4 – SSHI technika s mosfetovým spínáním	31
Graf 5 – Porovnání průběhů naměřených výkonů	34
Graf 6 – Graf výkonu Step-Up metody	39
Graf 7 – Průběhy výkonů Step-Up metody pro různé zatěžovací odpory	40

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je prostudovat problematiku energy-harvestingu s použitím piezoelektrických měničů. Další podmínkou je navrhnout 3 různé obvody pro energy-harvesting těchto piezoelektrických měničů a všechny v laboratoři na piezoelektrickém bimorfu otestovat.

Návrh by měl obsahovat čistě analogový obvod a měl by obsahovat konstrukci pokročilejšího obvodu s řídicí elektronikou. Cílem práce není vytvoření plně samostatně funkčních zařízení, která by pracovala v reálných podmínkách bez další pomocných zdrojů energie. V této práci jde spíše o prozkoumání základních principů vybraných metod a provedení umělých laboratorních měření na těchto metodách za účelem získání co největšího počtu údajů. Tyto údaje by zde měly být analyzovány a diskutovány. Z toho by mělo být rozhodnuto, zda jsou metody perspektivní pro další zkoumání a vylepšování za účelem nasazení do plně fungujícího zařízení.

Dále by mělo být měřením zjištěno, za jakých podmínek energy-harvesting nastává a s jakou účinností. To znamená prozkoumat hlavně využitelné frekvence přeměňovaných vibrací pro různé zapojení, či případně zkusit ovlivňovat elektronickými obvody hodnotu rezonance piezoelektrických měničů, kde je čerpaná energie největší.

Tato práce by také měla brát v úvahu energetické spotřeby složitějších energy-harvesting zapojení, kde se objevuje řídicí elektronika, která je nutná pro jejich správné fungování.

2 Piezoharvesting

V posledních letech na poli piezo energy-harvestingu došlo k velkému pokroku a to také díky rozrůstajícímu se počtu bezdrátových zařízení, která jsou závislá na vlastních zdrojích energie. Zde se výzkum zaměřuje na způsoby čerpání energie z okolního prostředí. V dnešní době většina těchto bezdrátových zařízení pracuje na elektrochemické baterie. To přináší problémy kvůli omezené životnosti těchto baterií, které se jednou za určitý čas musí vyměnit u každého takového zařízení. U použití těchto vzdálenějších zařízení se s tím musí počítat a už dopředu musí být nainstalována tak, aby se mohla provést výměna baterií nebo prodloužení životnosti baterií na dostačující dobu. Koncept energy-harvestingu má za úkol tyto problémy odstranit, měl by čerpat energii z okolí, která se zde v nějaké podobě vyskytuje a pomocí elektroniky převést tuto energii na energii užitečnou pro napájená zařízení. Tento koncept se vyvíjí směrem, kde napájená zařízení budou energeticky nezávislá a nebudou potřebovat vyměnitelné zdroje energie jako jsou například elektrochemické baterie. energii z okolí lze čerpat v mnoha formách, např. ve formě tepla, slunečního svitu, větru atd. Tato bakalářská práce se zabývá čerpáním energie z mechanických vibrací pomocí piezoelektrických měničů.

Bakalářskou práci se zaměřením na piezoelektrinu jsem si vybral proto, že tento výzkum má na TUL bohatou tradici, založenou na společném úsilí katedry fyziky a katedry elektrotechniky a elektromechanických systémů již v 50. a 60. letech. Rozvoj piezoelektriny byl sice díky okupaci v 1968 přerušen, ale naštěstí se na něj v roce 1995 opět na TUL navázalo. Univerzita disponuje piezoelektrickou laboratoří a laboratoří optické mikroskopie, rezonančních metod a optické interferometrie. Toto vybavení umožňuje měřit hlavní vlastnosti krystalů, kompozitů a keramik. TUL v roce 1999 založila International Center for Piezoelectric Research (IPCR). Toto centrum má za úkol zprostředkovávat spolupráci akademických věd s průmyslem, který má v tomto oboru výrobní praxi. Výzkumem piezoelektriny a feroelektriny se zabývá na TUL například doc. Jiří Erhart, Prof. Nosek nebo doc. Pavel Mokřý. Protože je piezoelektrina hlavní oblast výzkumu doc. Mokřého, díky němuž mohu využívat piezoelektrickou laboratoř. Tato práce zapadá do výzkumu na Fakultě mechatroniky, kde se zabývají

např.: moderními metodami potlačování hluku a vibrací pomocí piezoelektrických materiálů, elektromechanickými vlastnostmi pokročilých feroelektrických materiálů atd.

3 Fyzikální podstata a úvod do problematiky piezoelektřiny

3.1 Vysvětlení piezoelektrického jevu

Poprvé byl piezoelektrický jev pozorován bratry Curieovými, kteří stlačovali krystal turmalínu a při tom zjistili výskyt povrchového elektrického náboje. O něco později se jim podařilo objevit opačný jev, kde vnější elektrické pole vyvolávalo deformaci krystalu. Mechanická síla a namáhání krystalu vyvolává na jeho plochách elektrický náboj. Podmínkou je, že tyto krystaly nejsou středově souměrné (např. křemen, sfalerit, kyselina vinná, atd.), poté může vznikat výrazný piezoelektrický jev. Na průmyslovou výrobu takového krystalu se používá materiál, v jehož krystalové mřížce jsou zároveň kladné i záporné ionty, a výbrus destičky je takový, že na jedné straně jsou soustředěny kladné ionty a na druhé straně zase záporné ionty. To znamená, že výbrus se vlastně stane zdrojem elektrostatického pole, jehož intenzita (i napětí) je závislá na plošné povrchové hustotě nábojů a na vzdálenosti nábojů uvnitř krystalu.

3.2 Piezoelektrické látky

Jak už bylo napsáno, některé speciální látky, které nemají strukturu se středem souměrnosti, mohou vyvolávat piezoelektrický jev.

Mezi nejznámější látky, které vykazují piezoelektrické chování patří křemen, LiNbO_3 a LiTaO_3 nebo PVC (polymer). Ale v tomto výzkumu energy-harvestingu byla použita piezokeramika.

Materiály, které jsou založené na bázi tuhých roztoků oxidů olova, zirkonu a titanu, tj. PbTiO_3 (PT materiál) a PbZrO_3 (PZ materiál) jsou souhrnně označovány jako PZT keramika – $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$. Můžeme je nejspíše označit za nejvýznamnější vyráběné feroelektrické keramiky. Tyto feroelektrické vlastnosti také zaručují její piezoelektrickou vlastnost. Pokud bychom chtěli znát podrobnější informace, můžeme je nalézt třeba zde [3].

3.2.1 Piezoelektrické kompozitní struktury používané v energy-harvestingu.

Piezoelektrické kompozitní ohybové struktury se vyskytují v mnoha aplikacích. Vždy jde o nějaké polymorfy, nejčastěji unimorfy nebo bimorfy. Tyto polymorfy samozřejmě převádějí sílu na elektrickou energii a naopak.

Ještě před samotným popisem fyzikálního principu použitého piezoaktuátoru bude provedeno v této části základní rozdělení piezoelektrických kompozitních struktur.

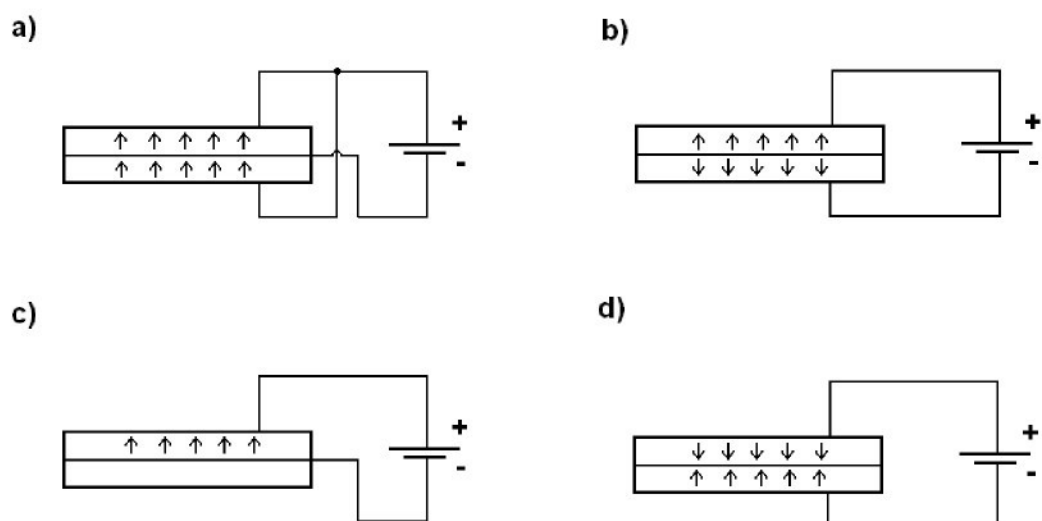
Unimorfy se používají v sirénách nebo pípácích. Jsou to tenké kovové plátky s nalepenou PZT keramikou v kruhovém tvaru. Tato keramika se zde vyskytuje pouze v jedné vrstvě.

Bimorfy se používají jako piezoaktuátory nebo naopak jako elektrické snímače ohybové deformace. Příklad použití piezoaktuátoru (převod elektrického signálu na mechanické posunutí) je v pletacím zařízení při vysunování a zasunování šicí jehly.

Polymorfy se používají například ve vstřikování paliva v motoru automobilu. Polymorfy se dají uspořádat do mnohavrstvého ohybového prvku nebo i do šroubovicové struktury.

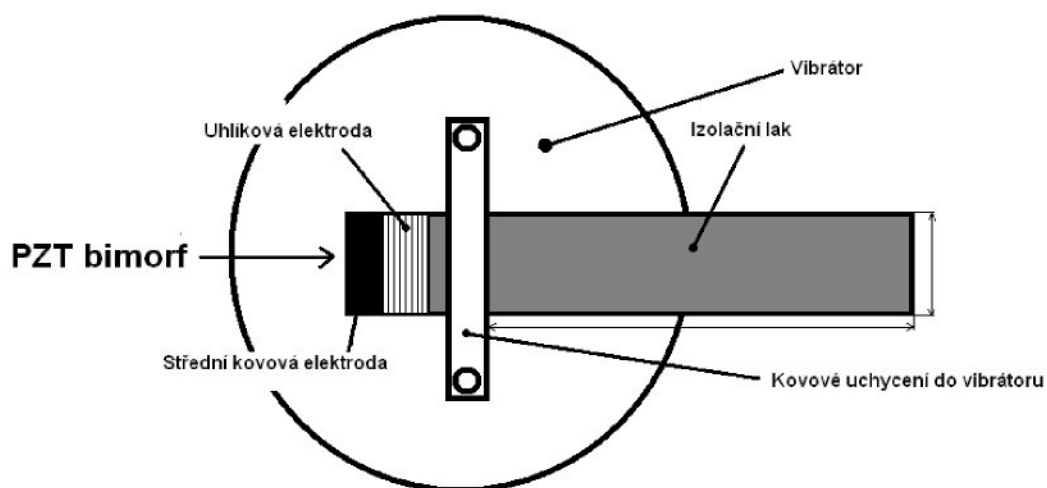
3.2.2 Piezoelektrický bimorf

Piezoelektrický bimorf je tenká destička skládající se z vrstev piezokeramiky a může být i kombinována s dalšími materiály. Rozlišujeme různé druhy bimorfu podle jejich konstrukce, připojení elektrod a polarizace prvků. Na obrázku 1. vidíme 4 různé používané druhy zapojení. Na obrázku 1.a vidíme zapojení, které bylo zvoleno pro testování zkoumaného piezo energy-harvestingu. Jedná se o paralelní zapojení bimorfu, které nám dává při stejném napětí dvojnásobnou výchylku oproti sériovému zapojení, jež je vidět na obrázku 1.b a obrázku 1.d. Tato dvě zapojení jsou principiálně totožné, pouze každé s opačnou polaritou při stejném směru výchylky. Na obrázku 1.c je zobrazeno zapojení unimorfu.



Obr. 1. Druhy bimorfů

V tomto výzkumu bylo použito paralelní zapojení bimorfů. Tento bimorf tedy měl dva souhlasně polarizované PZT plátky, které byly přilepeny na tenkou kovovou elektrodu.



Obr. 2. Obrázek bimorfu upevněného ve vibrátoru

Na obrázku č. 2. vidíme popisovaný bimorf s vyznačenými elektrodami na koncích a kovovém uchycení do vibrátoru.

3.5 Fyzikální podstata piezoelektrického jevu

Piezoelektrické bimorfy se deformují podle velikosti přiloženého napětí. Toto elektrické napětí vytváří v každém keramickém plátku elektrické pole. A naopak, deformace bimorfu generuje na jeho elektrodách elektrické napětí. Pokud vytvoříme elektrické pole paralelní s polarizací PZT keramiky, tak se plátek prodlužuje ve směru působení pole a smršťuje se v rovinách kolmých na elektrické pole. Naopak jestliže přivedeme elektrické napětí tak, že vytvoříme antiparalelní elektrické pole ke směru polarizace keramického plátku, plátek se prodlužuje v rovinách kolmých na elektrické pole a zkracuje ve směru pole. A vzhledem ke konstrukci bimorfu, kdy jsou dva piezokeramické plátky spojeny k sobě pomocí společně elektrody, se při správné polarizaci a přivedení napětí, jak je vidět na obrázku 1.a, začne bimorf ohýbat. Toto chování a velikosti deformací se dá matematicky popsat pomocí algebraických rovnic. Základní dvě rovnice, ze kterých se odvozují další vztahy, se nazývají lineární piezoelektrické rovnice.

$$\begin{aligned} T_{ij} &= c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k, \\ D_i &= e_{ikl} S_{kl} + \varepsilon_{ik}^S E_k \end{aligned} \quad (1)$$

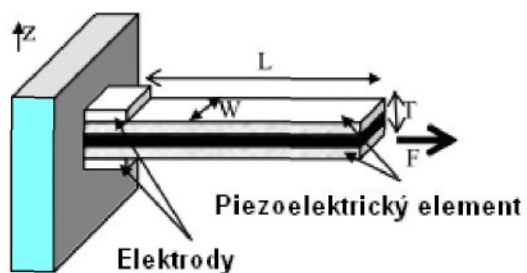
kde T_{ij} , S_{kl} , E_k a D_i jsou v pořadí složky elastického napětí, deformace, intenzity elektrického pole a elektrického posunutí.

Ještě jsou zde uvedeny gradientní rovnice, kde je vidět vztah mezi intenzitou elektrického pole a elektrickým potenciálem a mezi deformací a mechanickým posunutím.

$$\begin{aligned} E_k &= -\varphi_{,k}, \\ S_{kl} &= \frac{1}{2}(u_{k,l} + u_{l,k}), \end{aligned} \quad (2)$$

Jak bylo zmíněno, tyto rovnice patří k základním piezoelektrickým rovnicím. Dají se pomocí nich, za zjednodušených předpokladů, odvodit vztahy pro generovaný náboj

a při znalosti rozměrů a složení bimorfu vypočítat i rezonanční frekvence. Tyto rezonanční frekvence jsou velmi důležité, protože energy-harvesting při těchto frekvencích dosahuje nejvyšších výkonů. Obrázek č. 3. znázorňuje příklad použití piezoelektrické rovnice na bimorf.



Obr. 3. Základní struktura piezo-generátoru

$$\begin{aligned} S_1 &= s_{11}T_1 + d_{31}E_3 \\ D_3 &= d_{31}T_1 + \varepsilon_{33}E_3 \end{aligned} \quad (3)$$

kde

S_1 je síla ve směru osy x

T_1 je váha působící na nosník (N/m^2)

E_3 je intenzita elektrického pole v daném směru (V/m)

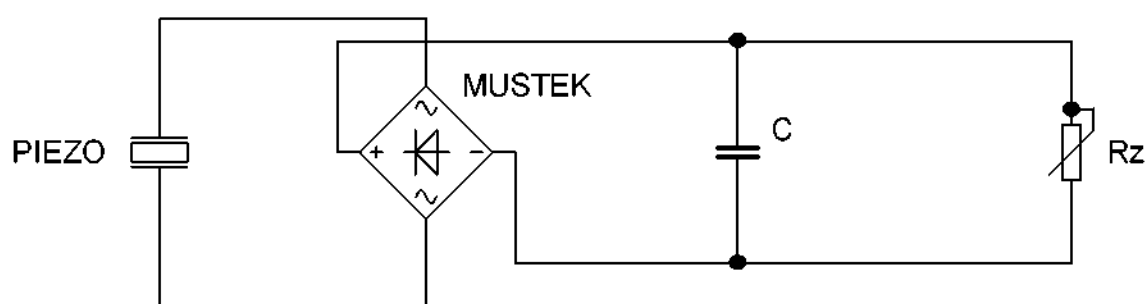
D_3 je hustota náboje (C/m^2)

s_{11} je elastická konstanta

d_{31} je piezoelektrický koeficient

4 Obvod s můstkovým usměrňovačem

Jako první zkoušený obvod bylo zvoleno klasické zapojení s můstkovým usměrňovačem. Tento obvod byl vybrán jako první, protože je to nejjednodušší konstrukce, jak získat stejnosměrný elektrický proud piezoelektrického bimorfu. Elektronická konstrukce obvodu je vlastně velmi jednoduchá, jeho zapojení je vidět na obrázku č. 4.



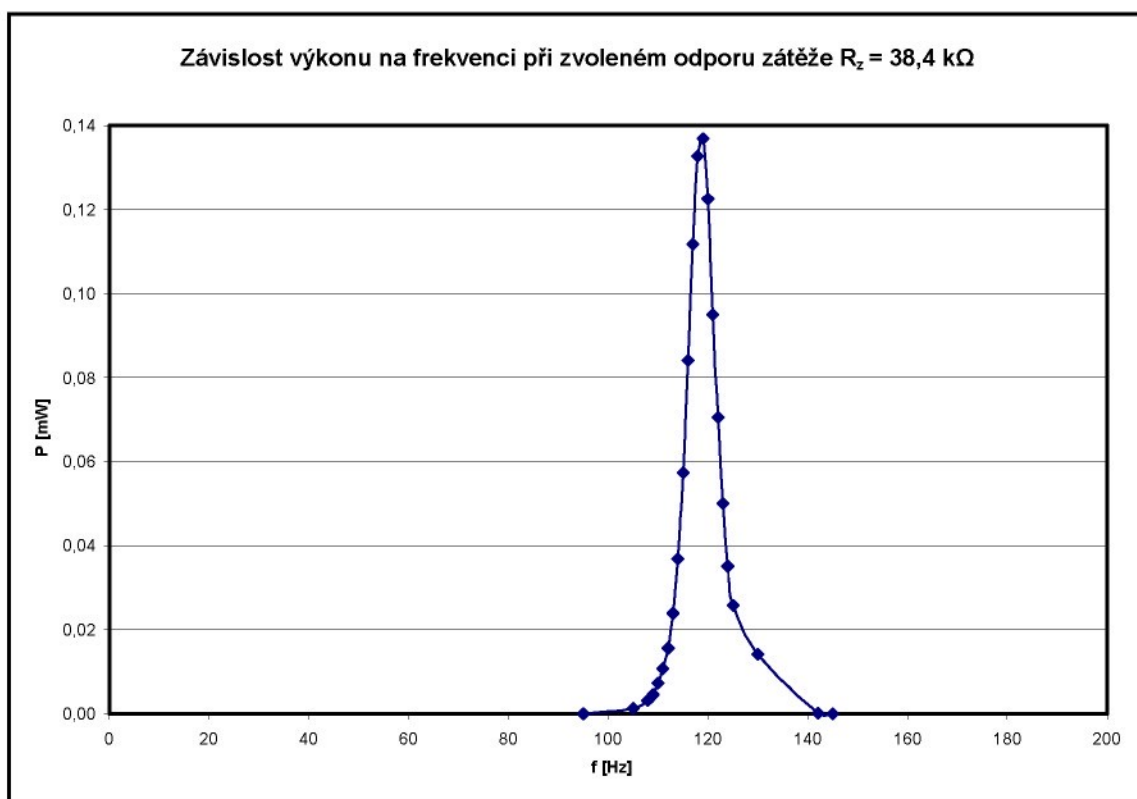
Obr. 4. Zapojení s můstkovým usměrňovačem

V zapojení je na levé straně piezoelektrický bimorf, který je ještě v reálném prostředí připojen mechanickou vazbou na vibrátor. Tato vazba přenáší vibrace na bimorf, který přeměňuje mechanickou energii na elektrickou. Protože tato vyrobená energie má logicky kladné a záporné hodnoty sinusového průběhu, musí se tento střídavý proud usměrnit na stejnosměrný proud. Proud se usměrňuje pomocí diodového můstku a následně vyhladí kondenzátorem. Teoreticky dostáváme na výstupu hladké stejnosměrné napětí, které je připojeno na zátěž R_z . Tento proud se také na této zátěži spotřebovává. Z naměřeného elektrického proudu procházejícího zátěží a elektrického napětí na této zátěži, můžeme zjistit výkon ztracený na zátěži. Tento výkon považujeme za výkon zmiňované piezo energy-harvestingové metody a patří k nejdůležitějším ukazatelům při porovnávání více různých metod.

4.1 Naměřené hodnoty

Po proměření a odzkoušení prvního zapojení bylo rozhodnuto provést sérii měření za účelem získání dat. Z těchto dat si lze udělat představu o vlastnostech zapojení a také srovnání s jinými typy zapojení. Série měření byla provedena vždy pro rozdílný zatěžovací odpor R_z , aby bylo vidět rozdílné chování obvodu a vlastně celé metody, kde se mění se zátěží účinnost piezo energy-harvestingu. Do dokumentu byly vloženy 3 grafy sestavené z naměřených hodnot. Na těchto grafech je vidět závislost výkonu ztraceného v zátěži na frekvenci kmitání piezoaktuátoru.

Na grafu 1 je vybrán jeden z průběhů závislosti výkonu na frekvenci budícího bimorfu. Tyto hodnoty byly naměřeny pro odpor 38,4 k Ω a při tomto odporu bylo v měření první metody dosaženo nejlepších výsledků energy-harvestingu.

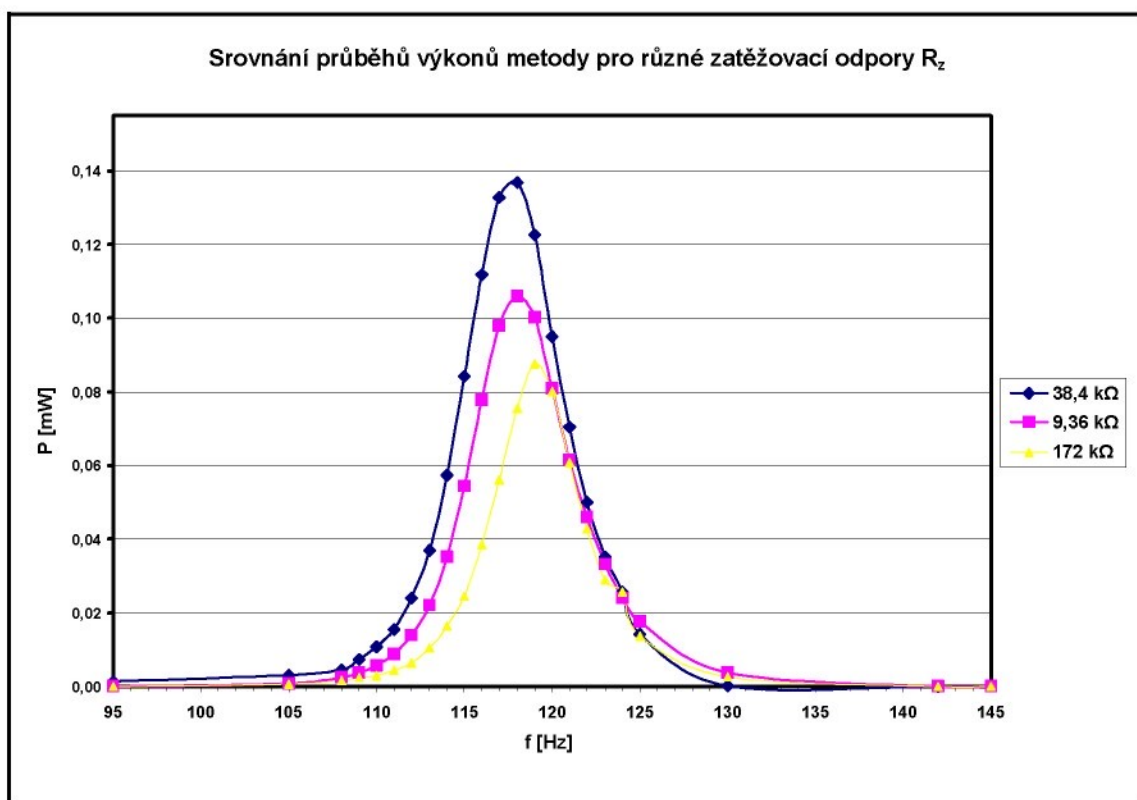


Graf 1 – Průběh výkonu pro zátěž 38,4 k Ω

Jak je na grafu vidět, zapojení generuje použitelný výkon jenom kolem rezonanční frekvence. V ostatních případech je výkon velmi malý, až téměř neměřitelný. Při měření této metody byla hlavně snaha proměřit výkonovou špičku. Body na této špičce jsou

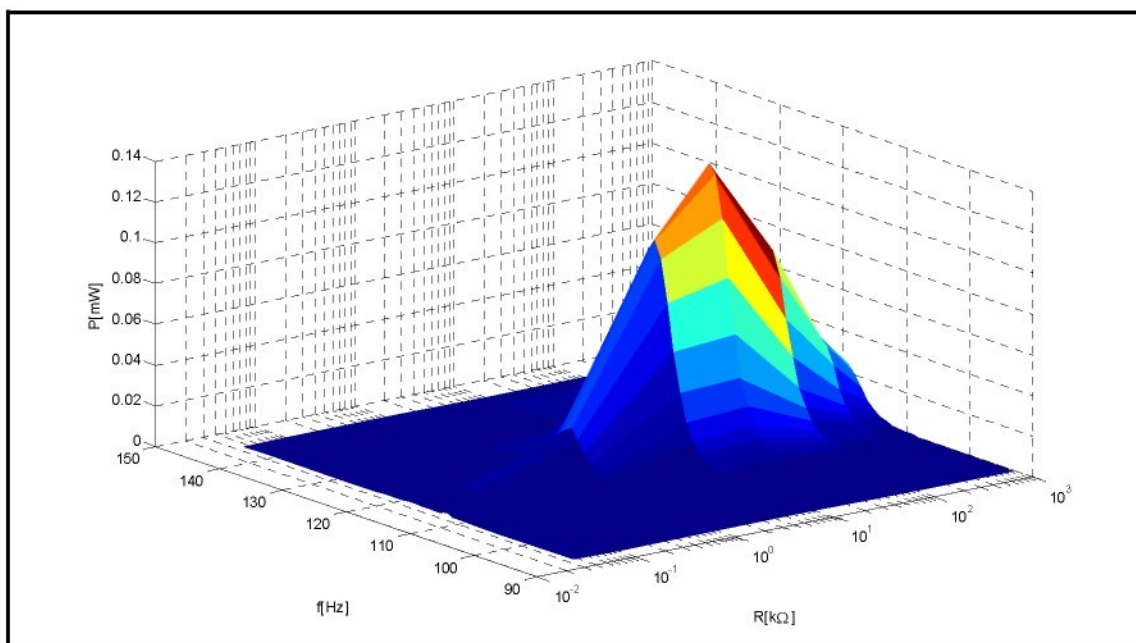
měřeny po jednom Hz. Nejvyšší výkon metody pro zvolený odpor byl stanoven na 119 Hz. To je hodnota, kde se dostává bimorf napojený na elektronický obvod do rezonance.

Na grafu 2 je vidět opět graf srovnání závislosti výkonu na změnu frekvence budící piezoaktuátor. Ale nyní jsou zde vloženy do jednoho obrázku pro srovnání tři průběhy. Tyto tři hodnoty odporů pro tři průběhy byly vybrány proto, že při nich byl naměřený největší výkon. Hodnota odporů je nižší a vyšší než stanovených optimálních 38,4 k Ω .



Graf 2 – Srovnání výkonů pro různé zátěže R_z

Na grafu 2 jsou zobrazeny průběhy pro hodnoty odporů 9,36 k Ω , 38,4 k Ω a 172 k Ω . Průběhů závislosti výkonu na frekvenci bylo naměřeno více než tyto tři uváděné. Pro hledání optimální hodnoty zatěžovacího odporu R_z a pro vytvoření si celkové představy o chování obvodu v závislosti na různém zatěžovacím odporu bylo zaznamenáno velké množství dat. Všechna tato data jsou zobrazena na grafu 3.



Graf 3 – 3D rozložení výkonu v závislosti na odporu R_z a frekvenci

Na 3D grafu je vidět závislost výkonu energy-harvestingu na budící frekvenci a odporu zátěže R_z . Rozsah zobrazované frekvence je zde za opět v hodnotách zhruba od 90 do 150 Hz a to proto, že pro ostatní frekvence uvažujeme výkon jako nulový.

4.2 Zhodnocení metody

Na grafech je vidět, jak se chová první metoda piezo energy-harvestingu v praxi. Výkonové srovnání nám dává představu o účinnosti metody, jestli tato metoda s daným nastavením bude účinná a zda má smysl se jí dále zabývat. Pokud se podíváme na všechny průběhy grafů, zjistíme, že zajímavé na nich je to, že mají společnou charakteristiku. Je vidět, že pro každou hodnotu odporu R_z , existuje nějaká rezonanční frekvence, kde je výkon piezo energy-harvestingové soustavy nejvyšší. Tato hodnota rezonance se pohybuje pro všechny tři grafy mezi 138 Hz a 139 Hz, což znamená, že vliv velikosti odporu na rezonanční frekvenci sice pozorujeme, ale je velmi malý a díky tomu nepodstatný. Na grafu 2 je vidět, že zatížení 38 k Ω na všech frekvencích podává nejlepší výkon, proto nemá smysl, jak bylo na začátku myšleno, impedanci obvodu přizpůsobovat frekvenci na buzeném bimorfu pro získání lepšího výkonu. Při rezonanční frekvenci je vidět výkonová špička na odporu R_z . Bohužel stačí posunout s frekvencí o 10 Hz nahoru nebo dolů oproti rezonanční frekvenci a efektivita

s výkonem piezo energy-harvestingové metody výrazně klesla pod hranici menší než 10% výkonu maximálního výkonu. Z grafu 3 si lze udělat dobrou představu o získaném výkonu v závislosti na buzené frekvenci a velikosti impedance obvodu. V tomto plošném prostorovém 3D grafu je vidět, kde se s hodnotami může pohybovat tak, aby obvod dával nezanedbatelný výkon a taky dokazuje to, že vybraná optimální hodnota zátěže je nejlepší pro všechny měřené frekvence a o jiných hodnotách odporu ani nemá smysl uvažovat.

Protože je tento obvod velmi jednoduchý, ztráty v něm se objevují pouze na diodovém můstku vlivem úbytku napětí. Tento jev je dán typem a funkcí diody a zde žádná další vylepšení už nejsou možná. U této metody to je maximum výkonu, co je schopna dodat.

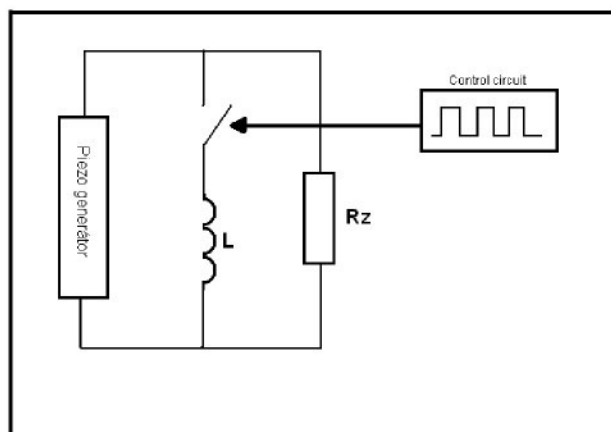
5 Metoda SSHI

5.1 Vysvětlení metody SSHI

Nelineární techniky jsou používány pro optimalizaci energy-harvestingu u piezoelektrických a elektromagnetických generátorů. Tato metoda vlastně zvyšuje napětí získané z těchto energy-harvesting technik. Všeobecně se tyto obvody používají proto, aby maximalizovali energetický zisk z piezoelektrických zařízení či případně i elektromagnetických mikro-generátorů. Snižování velikosti piezoelektrických aktuátorů vede logicky i k nižším výkonům, které je tato technologie schopna dodat. Proto jsou návrhy energy-harvestingových obvodů založené na nízkém příkonu a vysoké efektivitě. Doposud navrhované přístupy se skládají z přidaných tradičních AC/DC měničů. Tento AC/DC měnič bývá dále doplněn DC/DC měničem, který se v obvodech používá kvůli impedančnímu přizpůsobení.

V článku [1] je navržena nelineární technika pro piezoelektrický generátor zvaná Synchronized Switch Harvesting on Inductor, většinou se používá pouze zkratka SSHI. Do češtiny by se to dalo přeložit jako synchronní spínání cívky v harvestingu. Tato technika byla zvolena jako druhý obvod, protože se velmi často uvádí v literatuře [2] a bylo na ní provedeno v různých menších modifikacích několik pokusů.

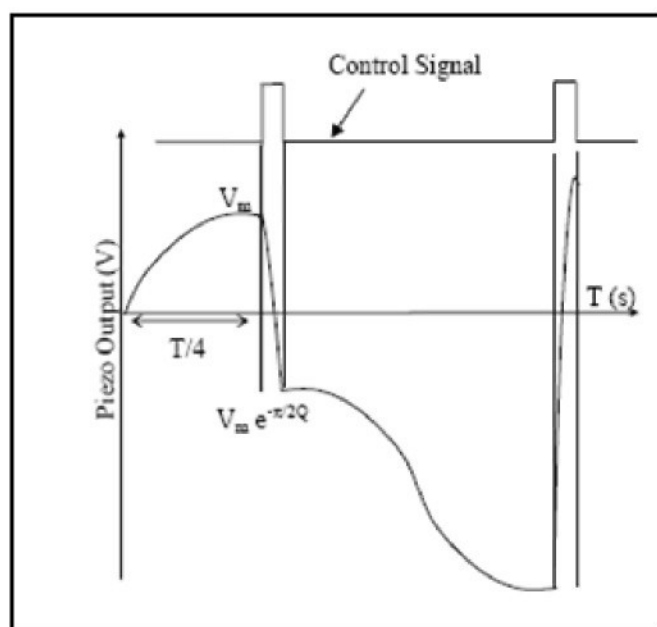
Metoda je založena na spínání cívky do obvodu. Na obrázku č. 5. je vidět, že tato cívka je zapojena paralelně s piezoelektrickým generátorem a k ní je sériově připojen elektronický spínač.



Obr. 5. SSHI metoda

Cívka je spínána elektronickým spínačem v momentě, kdy je výchylka bimorfu největší. Toto sepnutí cívky způsobí obrácení napětí na piezoelektrickém generátoru. Obrácení samozřejmě nenastává hned a vyznačuje se určitou strmostí, ale tato strmost je velmi vysoká. Rychlost obrácení závisí hlavně na frekvenci buzeného piezoaktuátoru, parametrech piezoaktuátoru jako je kapacita C_p a na indukčnosti cívky.

Spínání cívky způsobuje obrácení piezoelektrického generátoru napětí. Nicméně obrácení není dokonalé kvůli ztrátám na R_z . Na obrázku č. 6. je vidět popisovaný fenomén obrácení.



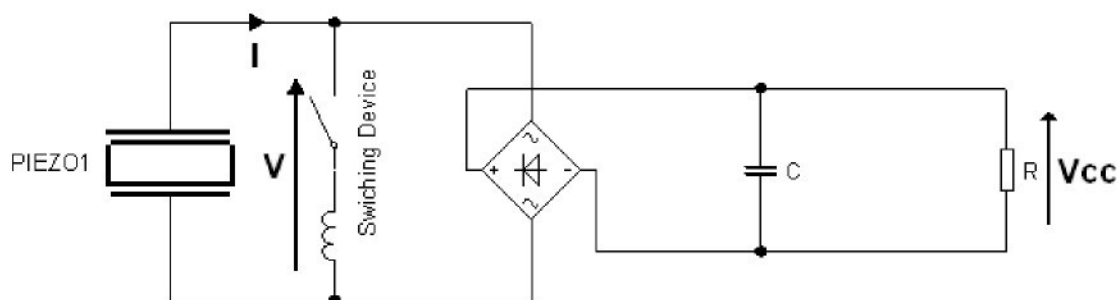
Obr. 6. SSHI metoda (časový průběh signálu)

Podle předpokladů tato metoda nejenže lépe odčerpává energii z piezoaktuátoru, ale nejspíše také zpětně upravuje vlastnosti zapojeného piezoaktuátoru a to tak, že dokáže s vyšší účinností přeměnit mechanickou energii ve formě vibrací na elektrickou. To je vlastně dáno tím, že elektronický obvod dovolí svým chováním zvětšení výchylky bimorfu. Další výhodou této metody je, že dokáže zvětšit napětí získané na piezoaktuátoru, což je velmi vhodné zejména v případech, kdy napětí generované na bimorfu je pouze několik voltů. Na diodovém můstku bývá úbytek napětí zhruba 1,5 V. Proto je lepší usměrňovat na můstku vyšší napětí, kde napěťový úbytek nebude tolik ovlivňovat celkovou účinnost metody.

Od této metody se očekává, podle zvážení všech okolností a poznatků načtených z předchozích pokusů, i několikanásobné zvýšení získané koncové elektrické energie. Musíme si uvědomit základní fakt, že tato metoda, nebo spíše tento obvod, aby správně fungoval, tak sám spotřebovává nějakou elektrickou energii. Tato energie je hlavně potřeba na vytvoření signálu, který otvírá elektronický spínač připojící cívku k piezoaktuátoru. Vzhledem k tomu, v jakých hodnotách výkonu se piezo energy-harvestingová metoda pohybuje, je tato energetická spotřeba nutná k provozu obvodu podstatný problém, se kterým se musí pro realizaci použitelného zařízení v praxi počítat. Proto v tomto pokusu tuto energii na ovládání, jak by mohla být nazvána, není započítána a bere se externě z oddělených zdrojů. Cílem této práce ani není finálně realizovat kompletní obvod, který by po zapojení fungoval zcela sám bez dalšího přísunu energie. Pouze se zjišťuje, zda tato metoda je vůbec realizovatelná a tyto další konstrukční a funkční problémy by se řešili později po uvážení všech okolností a zvážení, zda by mělo vůbec význam se tímto obvodem zabývat. Proto spouštěcí signál na elektronický vypínač se generuje druhým funkčním generátorem. Tím by bylo dosaženo jistého zjednodušení, kterým by byly odstraněny problémy s náročnou konstrukcí energeticky soběstačného zařízení, která by nejspíše zabrala celou samostatnou práci.

5.2 Zapojení metody SSHI

Na obrázku č. 7. vidíme celé obecné schéma metody, kde je jak piezoaktuátor, tak samotný odpor s koncovou zátěží prezentovanou odporem R .



Obr. 7. Schéma zapojení SSHI metody

Z obrázku č. 7. a předchozího vysvětlení je patrné, že cívka je spínána elektronickým spínačem paralelně do obvodu přesně daným signálem. Dále je připojen diodový můstek s filtračním kondenzátorem a k němu připojena samotná zátěž R_z , místo které může být ve skutečnosti připojena například nabíjecí baterie nebo svítící LED dioda.

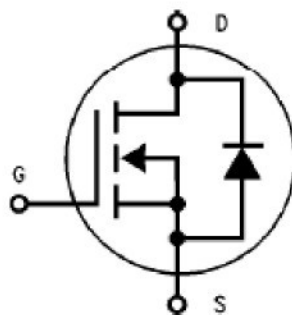
Tato SSHI metoda byla realizována dvěma způsoby. Oba způsoby se liší v podstatně rozdílném přístupu k řešení spínání cívky. Oba tyto způsoby zde budou popsány a jejich naměřená data na konci srovnána a zhodnocena. Musíme si uvědomit, že principiálně oba způsoby zapojení fungují stejně, ale budou mít rozdílné výsledky. Zejména díky rozdílným spínacím odporům a injektovanému náboji z polovodičových součástek do našeho energy-harvesting obvodu, které budou nejspíše způsobovat v určité míře nežádoucí zkreslení naměřených dat.

5.3 Metoda SSHI realizována pomocí MOSFET tranzistorů

V tomto odstavci bude popsán funkční návrh obvodu metody SSHI pomocí MOSFET tranzistorů, také zde bude popsána samotná konstrukce a řešené problémy. Při konstrukci tohoto obvodu se samozřejmě nepoužívalo buzení piezoaktuátoru, ale místo něho byl, pro simulaci a správnou funkčnost obvodu, připojen funkční generátor. Tento generátor se nastavil pro generování sinusového signálu s patřičnými hodnotami, které se měly co nejvíce přibližovat generované energii z piezo krystalu. Musíme si uvědomit, že tento způsob simulace nemůže ve výsledku odpovídat reálnému chování piezo energy-harvesting obvodu, protože generátor dodává stále stejný signál, který není závislý na odebíraném proudu, jak by to bylo u skutečného piezo krystalu. Ale pro odzkoušení fungování spínání to stačí.

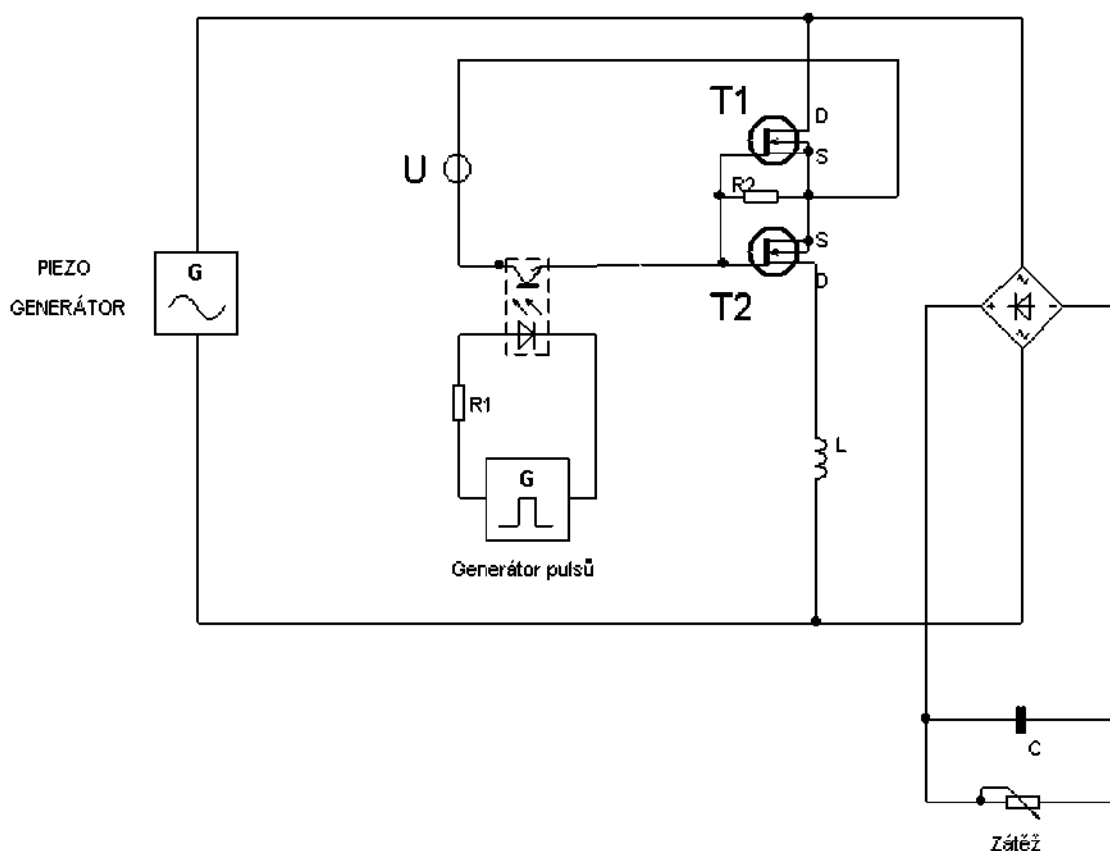
U základní funkce obvodu spínání cívky paralelně k piezoaktuátoru se objevil problém tohoto návrhu. Při prvním testování obvodu, který byl měřen a sledován na osciloskopech, bylo zjištěno, že nefunguje zcela správně. Jedna z nevýhod generování elektrické energie z piezoelektrického bimorfu je ta, že napětí má sinusový signál nabývající kladných i záporných hodnot. Proto se také musí usměrňovat a proto se tento signál spouští pouze jedním MOSFET tranzistorem. Toto řešení by fungovalo jenom v případě, kdyby elektrický proud neměnil svojí polaritu a tekla by stále stejným, předem daným směrem.

Původní řešení spínání obvodu jedním MOSFET tranzistorem bylo chybné, protože tento tranzistor propouští proud v opačném směru z Drain do Source za jakýchkoliv podmínek a napětí na Gate na to nemá vůbec žádný vliv. Na obrázku 8. je vidět vnitřní schéma unipolárního MOSFET tranzistoru, kde je mezi Drain a Source v závěrném směru zapojená dioda. Tato dioda zde samozřejmě není schválně, ale vychází z principu mosfetového tranzistoru. Použil jsem konkrétně MOSFET (BS170), což je standardní MOSFET s indukovaným kanálem. Jeho parametry, ze kterých bylo vycházeno, jsou zde [7].



Obr. 8. Schéma MOSFETU, typ BS170

Proto bylo navrženo jiné řešení se zapojením antiparalelního spojení dvou mosfetových tranzistorů, jak je vidět na obrázku č. 9. Toto zapojení dokáže spínat a propouštět i střídavý proud a celé je říditelné jedním správně přivedeným signálem. Tento spínací signál musí splňovat jedinou podmínku, a to, že napětí přivedené na hradlo (gate) musí být kladnější než napětí přivedené na source. Tato podmínka vychází z principu mosfetového tranzistoru, kdy kladnější napětí přitáhne elektrony a mezi elektrodami source a drain vznikne nová vrstva, která se chová jako vodivý kanál. Ale v tomto antiparalelním zapojení jsou dva mosfetové tranzistory spínané jedním generovaným signálem vždy o stejné předem nastavené hodnotě. Proto podmínka sepnutí musí platit pro oba tranzistory, a to se ukázalo zpočátku jako problém. Pokaždé, když bylo přivedeno dostatečně velké napětí na obě elektrody gate tranzistorů, nepodařilo se zcela správně zajistit funkční spínání elektronického spínače.



Obr. 9. Fungující zapojení metody SSHI pomocí mosfetů

Nakonec bylo zjištěno, že spínací signál nesmí být připojen na zem piezo generátoru, protože v tomto způsobu zapojení fungoval spínač pouze pro jednu polaritu spínaného signálu. A to díky tomu, že pracoval jenom jeden tranzistor. Proto byla přivedena záporná svorka generovaného spínacího signálu mezi oba tranzistory. Tento obvod vytvořený pouze pro spínání tranzistorů, aby správně plnil svoji funkci, musel být galvanicky oddělen od napájení a spínán přes optočlen typu 4N35 [9]. Kompletní spínací obvod s generátorem, zdrojem pro spínací signál a samotnými spínanými MOSFET tranzistory je vidět na obrázku č. 9.

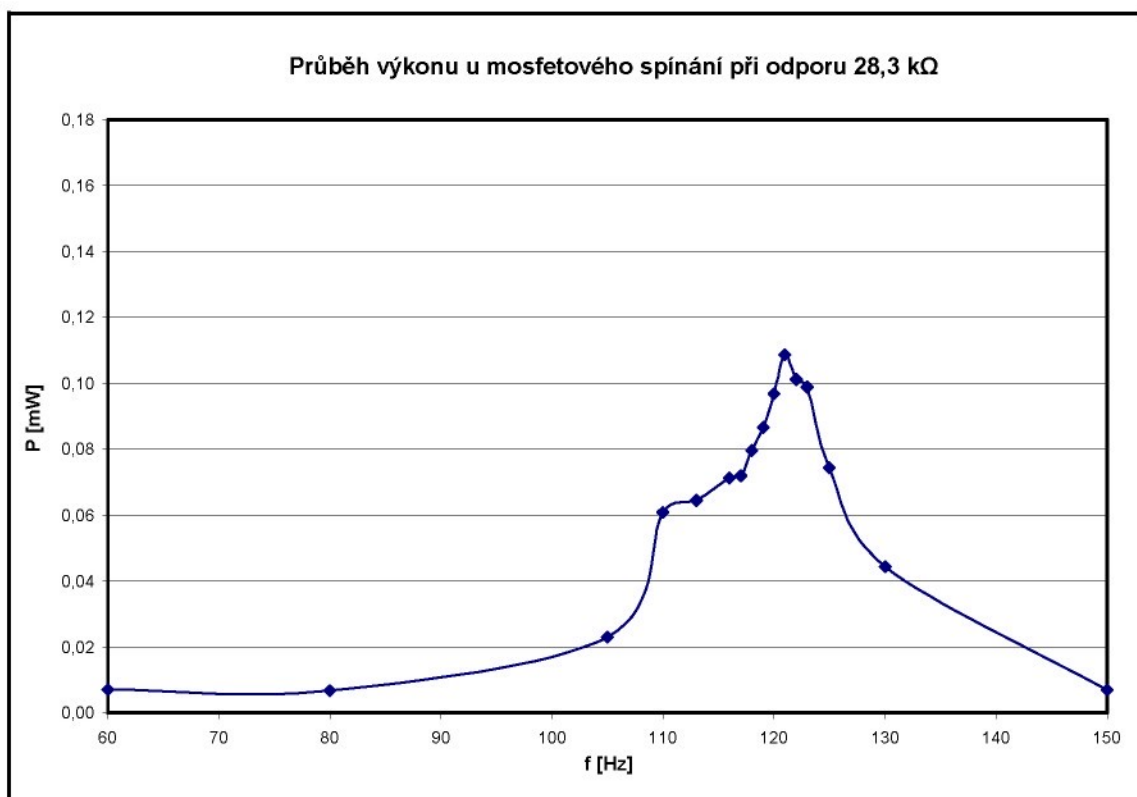
Tento obvod byl použit pro odzkoušení energy-harvestingové metody připojené na keramický bimorf. K tomuto bimorfu je paralelně připojen usměrňovací můstek a spínaná cívka dělající požadovaný SSHI efekt. Za usměrňovačem je opět filtrovací kondenzátor a zátěž.

Nejzajímavější na schématu jsou spínací obvody uprostřed. Nejdříve zde máme generátor impulsů, který pro své správné fungování za chodu obvodu musel být fázově zavěšen na generátor generující budící signál pro vibrátor piezoelektrického bimorfu. Tím jsme docílili toho, že impuls spínání přišel vždy ve chvíli, kdy výchylka bimorfu byla nejvhodnější pro uzemnění cívky, tak jak bylo popsáno výše k teorii SSHI. Protože spínací obvod musel takzvaně „volně plavat“, musel být galvanicky oddělen. Tento galvanicky oddělený obvod jsme spínali pomocí optočlenu, na který byl přiveden signál z generátoru pulsů. Galvanické oddělení bylo zařízení pomocí malého spínaného zdroje s usměrňovačem a paralelně připojeným vyhlazovacím kondenzátorem. Celý tento obvod byl z jedné strany přiveden na hradla obou tranzistorů T_1 a T_2 a z druhé strany mezi source elektrody obou tranzistorů. Tím bylo docíleno podmínek sepnutí pro oba tranzistory, že napětí na hradle (gate) musí být vždy kladnější napětí než na source. Protože mosfetovým tranzistorům pro otevření stačí velmi malý proud řádově nA, jsou to tranzistory ovládané napětím, musel se přidat odpor R_2 mezi společné source elektrody a společné hradla elektrody tranzistorů. Přes tento odpor se ztratí zbylý náboj, který měl do té doby tendenci i po vypnutí impulsu na hradla zde zůstat a nechat tranzistory otevřené. V důsledku tohoto potom docházelo ke zpožděnému uzavření tranzistorů nebo nežádoucímu postupnému vypínání. Po přidání odporu sepnutí a vypnutí tranzistoru probíhalo okamžitě. Odpor tohoto antiparalelního tranzistorového spínače nepřesahuje $5\ \Omega$. Nevýhoda takto řešeného spínání je pomalá frekvence, kterou můžeme spínat. Mosfetové tranzistory jsou sice velmi rychlé, ale problém je v optočlenu oddělovacím galvanicky obvod. Podle datasheetu [9] a laboratorních měření nezvládá optočlen spínat rychleji jak $2\ \mu\text{s}$. To sice není mnoho, ale pro použitý bimorf, kde se jeho rezonance pohybuje kolem 120 Hz, to bohatě stačilo.

5.4 Naměřené hodnoty

Hodnoty změřené pro toto zapojení byly měřené stejnou metodou jako při měření prvního obvodu. To znamená, že dosažený výkon pomocí této metody byl měřen jako ztrátový výkon na zátěži. I zde opět byla udělána série dat pro několik hodnot odporů zátěže, aby se posléze mohla vybrat nejvhodnější zátěž pro tuto metodu.

Na grafu 4 je vybrán průběh závislosti velikosti výkonu na frekvenci buzení bimorfu.



Graf 4 – SSHI technika s mosfetovým spínáním

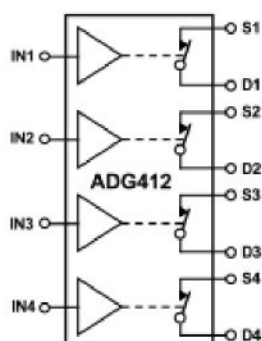
Jak je na grafu vidět, ani v rezonanci hodnoty výkonů nedosahují optimistických čísel. Podle tohoto měření zapojení dokonce snižuje účinnost obvodu, kde maximální hodnota výkonu, která se podařila naměřit, je 0,11 mW. Pro srovnání v prvním zapojení s můstkovým usměrňovačem se podařilo dosáhnout hodnoty 0,136 mW. Po zjištění těchto výsledků bylo diskutováno, zda princip této metody je vůbec správný. Metoda SSHI samozřejmě správná je. Na této metodě bylo provedeno už několik nezávislých pokusů, které ve výsledku potvrzovali i násobné zvýšení výkonu harvestingu. Proto bylo rozhodnuto, že se tato metoda bude zkoumat ještě jednou, ale s jinak vyřešeným spínáním cívky.

5.5 Metoda SSHI realizována pomocí ADG411 switche

Zde bude popsána metoda SSHI, která má realizované spínání cívky pomocí elektronického integrovaného obvodu ADG412. Tento integrovaný multi-switch, jak by mohl být nazván, je vyroben LC²MOS technologií, která zaručuje velký rozsah napětí, rychlé přepínání a nízkou spotřebu.

5.5.1 Obecný princip switche

Přepínač se chová jako klasické spínací relé nebo spínač. Výhoda switchů je, že jsou zapouzdřeny v integrovaném obvodu, jsou výrazně rychlejší než klasické spínací prvky a jsou spínány napětím přivedeném na řídicí brány.



Obr. 10. Funkční blokový diagram ADG412

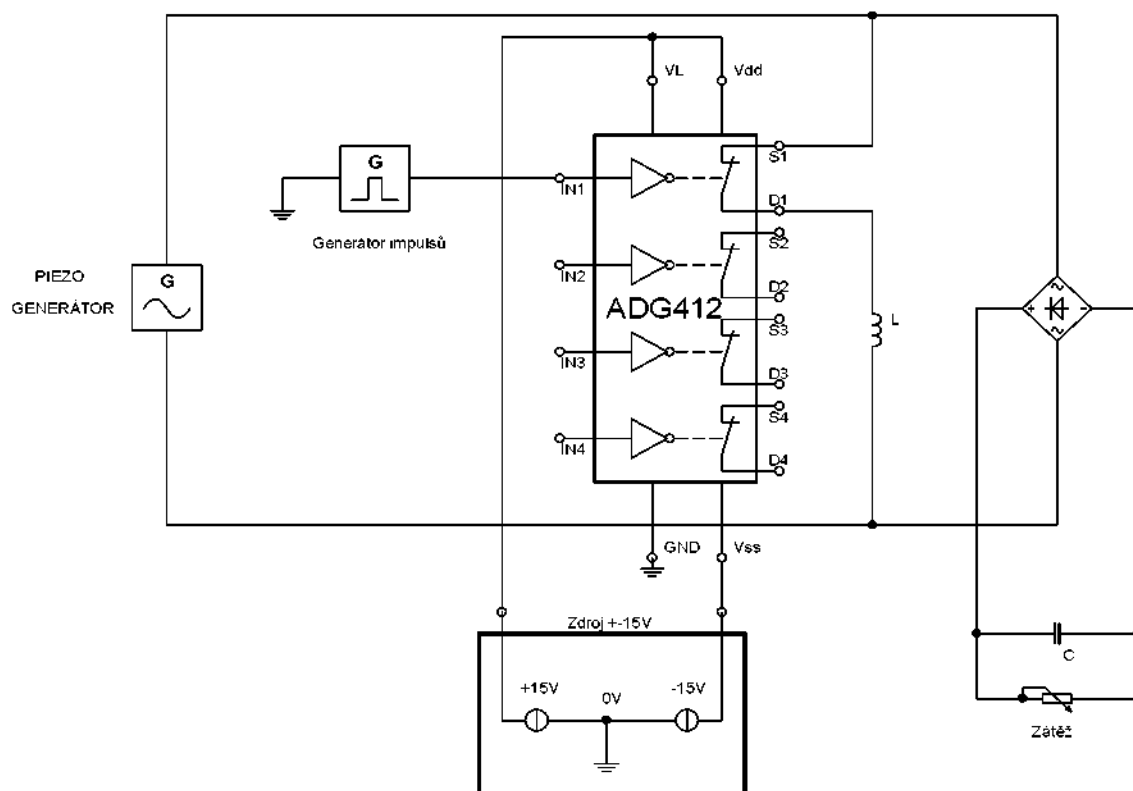
5.5.2 Popis a parametry switche ADG412

ADG412 je CMOS zařízení zahrnující 4 nezávislé volitelné přepínače. Je navržen na zdokonaleném LC²CMOS procesu, který poskytuje nízkou spotřebu, poskytuje vysokou rychlost přepínání. Každý přepínač vede proud při sepnutém stavu v obou směrech. Odpor spínače v sepnutém stavu je 35 Ω . To je docela velký odpor, což je dáno tím, že obvod je určen ke spínání signálů.

- 44 V maximální napájecí rozsah napětí
- ± 15 V analogového vstupního napětí
- Horší odpor v propustném směru ($< 35 \Omega$)
- Nízká spotřeba ($35 \mu\text{W}$)
- Rychlé doby přepínání

$$t_{\text{OFF}} < 145 \text{ ns}$$

Podle hodnot a popisu zapojení v datasheetu [8] k tomu elektronickému spínači bylo navrženo schéma zapojení, kde je tento obvod použit jako spínací prvek v metodě SSHI. Na obrázku č. 11. je vidět SSHI obvod se zapojením integrovaného obvodu ADG412.

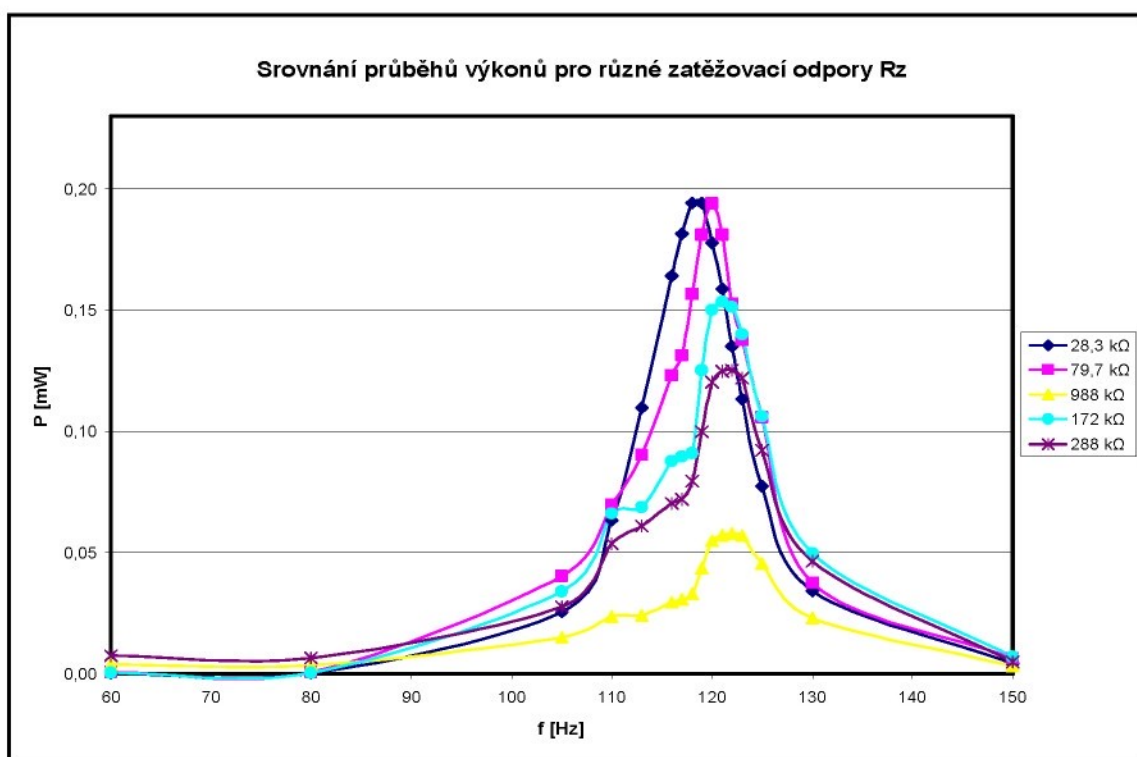


Obr. 11. Schéma metódy SSHI pomocou integrovaného obvodu ADG412

Obvod na tomto obrázku je stejný jako předchozí měřený obvod s tím rozdílem, že zde je místo mosfetových tranzistorů přidán integrovaný elektronický switch ADG412. Tento integrovaný switch musí být napájen ze zdroje +15 V, které jsou přivedeny na svorku V_{dd} a -15 V, které jsou přivedeny na svorku V_{ss} . Dále musíme na obvod přivést logické hodnoty, které byly v našem případě +15 V na svorku V_L a 0 V na svorku GND. Po splnění těchto podmínek obvod funguje bez problému a protože je velmi rychlý, frekvence spínání může být i několik desítek kHz. Takto vysoká frekvence je sice pro tuto metodu zbytečná, protože z principu metody SSHI vyplývá, že frekvence impulsního signálu je přesně dvakrát větší než frekvence sinusového signálu budícího piezoaktuátor. To znamená, že je zde obvod spínán signálem do 300 Hz.

5.6 Naměřené hodnoty

Zde je opět přiložen graf naměřených výkonů pro konkrétní frekvence. Průběhů bylo naměřeno více pro různé zatěžovací odpory R_z . Metodika měření byla stejná jako u předchozích případů, proto se tyto data mohou přímo srovnávat s ostatními případy. Na grafu 5 je vidět několik zkonstruovaných grafů najednou.



Graf 5 – Porovnání průběhů naměřených výkonů

Z tohoto grafu můžeme vyčíst, že metoda čerpá až 200 μW výkonu, což bylo doposud nejvíce, čeho bylo dosaženo. Těchto několik grafů v obrázku je zde daných pro představu, co se s harvesting obvodem děje při změně zatěžovacího odporu. Je zde vidět velký vliv zatěžovacího odporu na velikost a charakteristiku výkonu.

5.7 Zhodnocení metody SSHI

Předešlé série měření dokazují fungování metody SSHI. Byly zde vyzkoušeny dva obvody zapojení pro tuto metodu, lišící se pouze v principu spínání cívky do země. První způsob spínání pomocí antiparalelního zapojení mosfetových tranzistorů, do kterého byla zpočátku vkládána velká naděje, nás ve výsledcích zklamal. Výkon této metody překvapivě nedosáhl ani výkonů podávající první čistě můstkové zapojení. Tyto výsledky mohou být důsledkem porušení podmínek měření, které měli být pro testování všech metod stejné.

Druhý způsob spínání pomocí elektronického switchu integrovaného v obvodu ADG412 fungoval už daleko lépe. Tento obvod je docela kvalitně vyřešený a velmi pomohl usnadnit konstrukci obvodu. I když i tento integrovaný obvod má spínání řešené pomocí antiparalelního zapojení tranzistorů, je zde jeho zapojení vyřešeno daleko lépe. Obvod má relativně větší odpor pohybující se při sepnutí spínače do 35 Ω . Zde bylo dosaženo hodnoty 200 μW , což byl do této doby největší získaný výkon.

Při práci těchto obvodů, kde je spínání řešeno pomocí polovodičů a hodnoty výkonů se pohybují v desetinách mW, by se mělo také vzít v úvahu to, že je nějaký náboj injektován z hradla do samotného energy-harvesting obvodu. Tato energie vlastně přispívá ke zvýšení celkové hodnoty výkonu metody a zkresluje výsledky velikost výkonu na zátěži, které jsou považovány za čistý výkon piezoelektrického bimorfu. V těchto řádech výkonů mohou být tyto chyby už znatelné a mělo by se s nimi v budoucnu počítat a případně je zlepšením konstrukce co nejvíce snížit.

V zapojení byla použita cívka o velikosti 100 mH a spínací signál s frekvencí od 120 Hz do 300 Hz a střídou 2,53%. To odpovídá pulsu o délce 0,2 ms. Frekvence

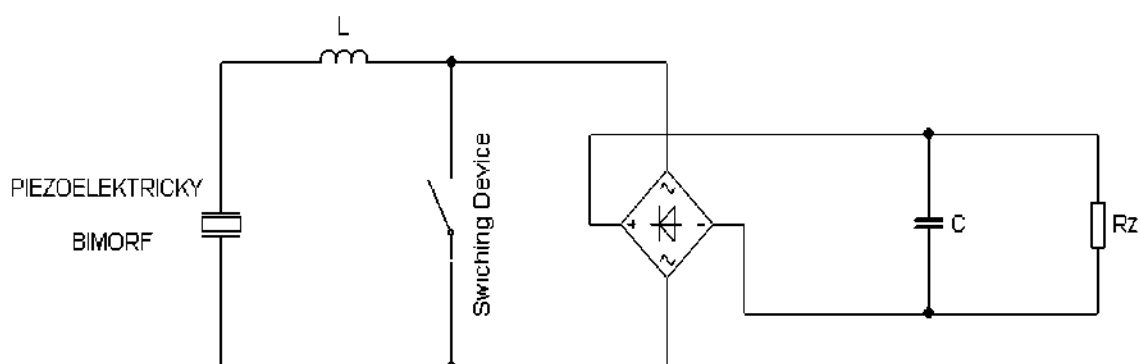
spínaného signálu musí být přesně dvakrát větší a fázově zavěšena v daném úhlu na budící signál. Optimální velikost fázového úhlu se pohybovala mezi 60° a 90° . Tento úhel zavěšení byl ručně nastavován pro každou frekvenci podle hodnoty napětí a proudu, kde dosahovaly svého maxima.

6 Metoda Step-Up měniče

Tato kapitola se zabývá poslední zkoumanou metodou energy-harvestingu založené na principu spínaného Step-Up měniče nebo někdy také v anglosaské literatuře nazývaného jako BOOST.

6.1 Vysvětlení metody

Jak bylo napsáno, tato metoda je založena na principu spínaného zdroje. Pro částečnou předlohu konstrukce jejího obvodu posloužilo zapojení Step-Up měniče. I když Step-Up měnič funguje pro stejnosměrné obvody, tak se jeho princip podařilo částečně využít i pro střídavý piezoelektrický generátor.



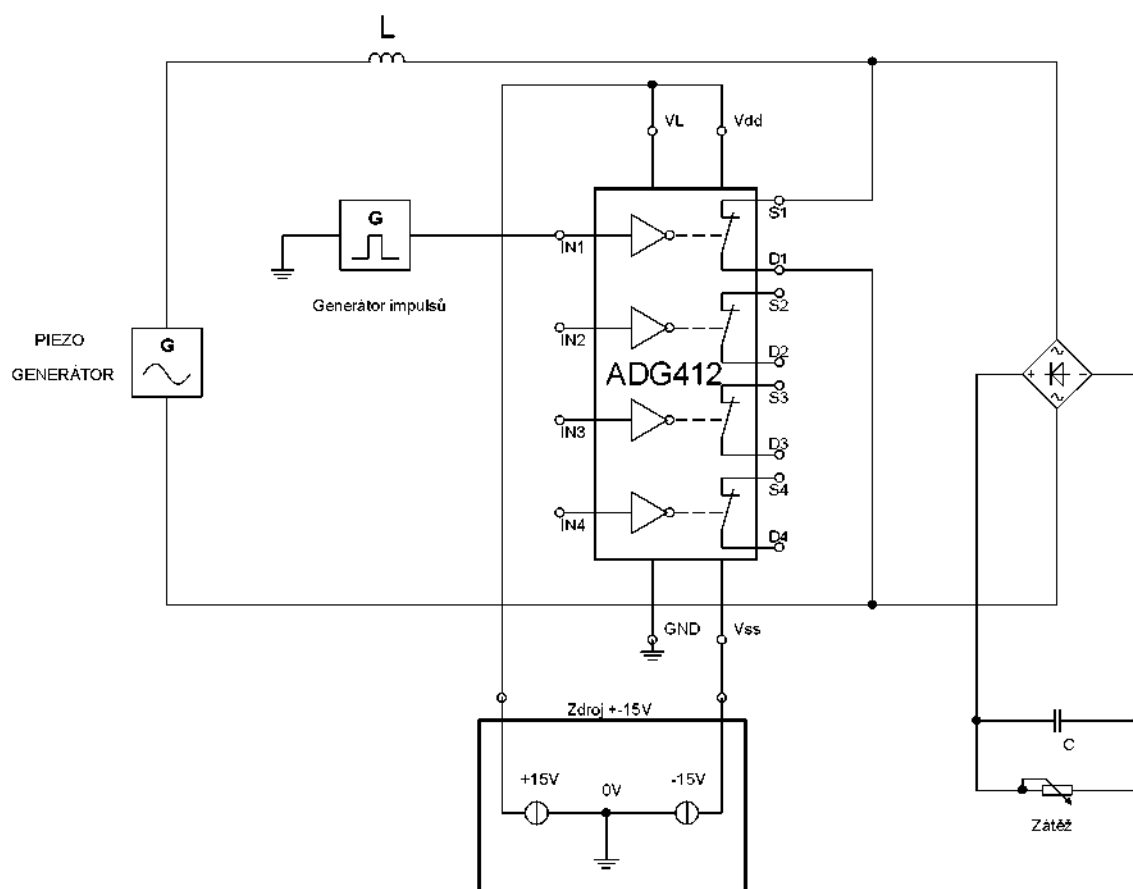
Obr. 12. Schéma metody Step-Up měniče

Na obrázku č. 12. vidíme zapojení Step-UP metody. Během doby t_1 (kdy je sepnutý spínač S) se vybíjí výstupní kondenzátor do zátěže a protože je oddělen usměrňovacím můstkem, nemůže se při sepnutém stavu vybíjet přes spínač. Z bimorfu teče proud přes cívku L a spínač. V ní se akumuluje energie v magnetickém poli a proud cívku narůstá až do doby, kdy je spínač vypnut. V tomto okamžiku se cívka snaží zachovat směr a velikost proudu a vzniká na ní indukované napětí. To znamená, že výstupní napětí je součet napětí indukovaného s napájecím napětím na piezo generátoru. Tento děj, kdy malá indukčnost musí být spínána vysokou frekvencí, probíhá velmi rychle a tváří se pro piezo generátor jako obvod spojitý.

Velikost napětí indukovaného na cívce závisí na indukčnosti, rychlosti vypnutí spínače a na velikosti původního proudu. Toto výstupní napětí na zátěži je vždycky větší než napětí vstupní generované z piezoelektrického bimorfu.

6.2 Realizování metody

Jako spínací prvek, v této Step-Up metodě, jsem se rozhodl použít vyzkoušený elektronický switch ADG412. Bližší popsání tohoto integrovaného obvodu nalezneme v podkapitole 5.5.2. Zde bylo konečně využito výhody tohoto integrovaného obvodu v jeho rychlosti přepínání, která se pohybuje do 180 ns. Díky takto rychlému času spínání se může obvod spínat klidně několika kHz signálem. Na obrázku č. 13 je kompletní zapojení Step-Up metody s obvodem AGD412.



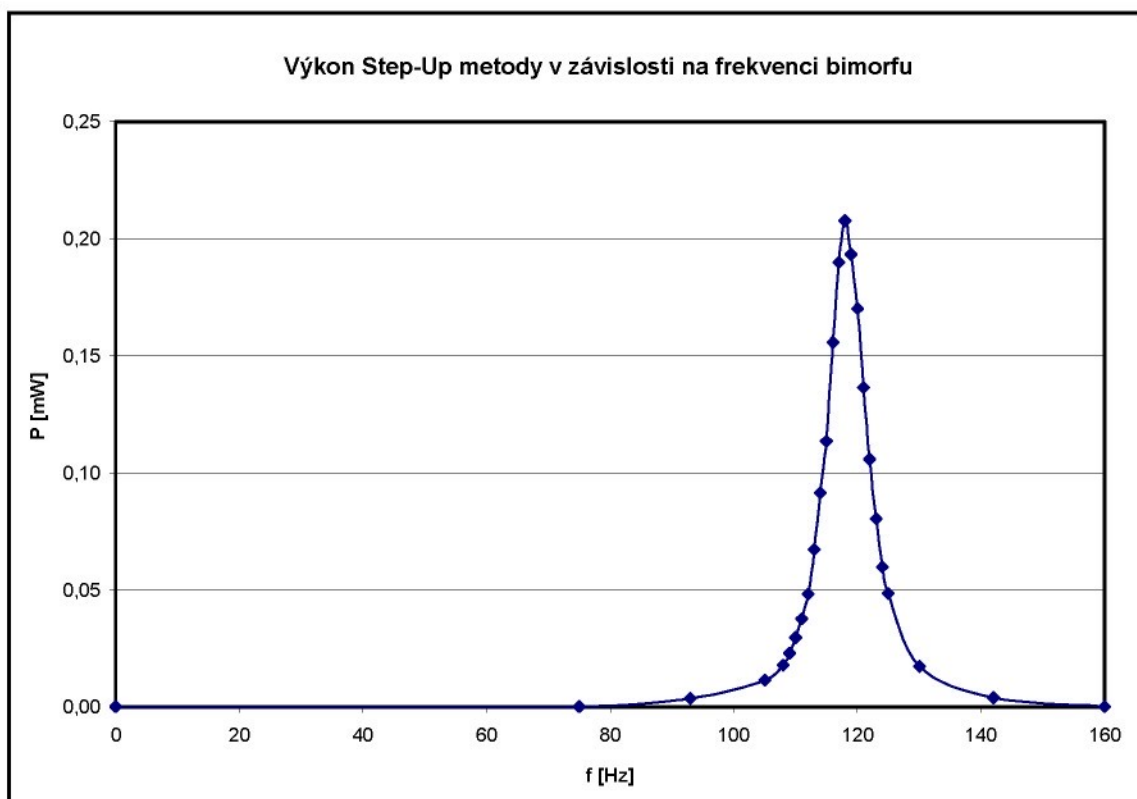
Obr. 13. Elektronické schéma zapojení metody Step-Up měniče

Obvod je velmi podobný obvodu metody SSHI řešený také pomocí integrovaného obvodu ADG412, akorát je zde změna v pozici cívky a spínače.

6.2 Naměřené hodnoty

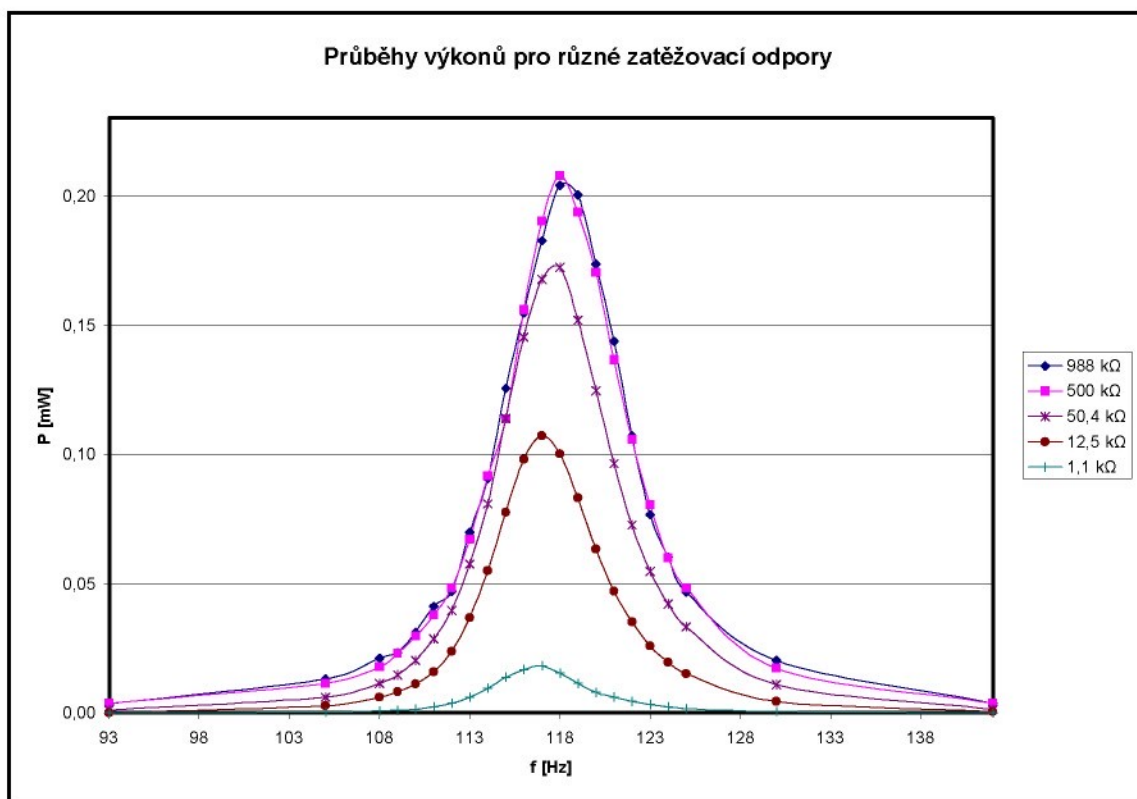
Energetické hodnoty obvodu jsem opět měřil za stejných podmínek jako v předchozích případech. To znamená, že vibrátor pohybující s bimorfem byl buzen signálem 20Vpp. Frekvenci spínaného zdroje jsem zvolil díky velikosti indukčnosti na 3Khz, což cívce bohatě stačilo a efekt správného indukování mohl probíhat.

Na obrázku č. 6. grafu je vidět vybraný průběh závislosti získaného výkonu na měnící se frekvenci.



Graf 6 – Graf výkonu Step-Up metody

Na obrázku č. 7. tohoto grafu je vidět srovnání výkonů pro různé zatěžovací odpory R_z . Nejlepších výsledků se dosáhlo pro odpor 0,5 M Ω . Naměřené průběhy vypadají přesně tak, jak se po předchozích zkušenostech očekávalo.



Graf 7 – Průběhy výkonů Step-Up metody pro různé zatěžovací odpory

V tomto zapojení byla použita cívka o indukčnosti 100 mH a spínací signál s frekvencí 3 kHz a střídou 15%. To odpovídá pulsu o délce 52 μ s.

6.3 Zhodnocení metody

Z grafů je patrné, že výsledky dopadly velmi dobře. Maximální výkon, který je schopna metoda dodat při optimální zátěži 0,5 M Ω , je 0,21 mW. To je největší získaný výkon energy-harvestingem v této práci. Na grafu 7 je vidět, jak se pohybuje výkon soustavy v závislosti na zatěžovacím odporu, kdy největších hodnot dosahujeme při 0,5 M Ω , a poté se zvětšujícím se odporem efektivita klesá. Charakteristiky pro hodnoty zátěže na 1 M Ω už nebyly udělány, protože pouze pokusným měřením jsem zjistil, že výkony s přibývajícím odporem rychle klesají. I u této metody vybraná optimální zátěž 0,5 M Ω svojí výkonovou charakteristikou prakticky překonává všechny ostatní. Proto by se měla volit taková impedance napájeného zařízení, která se bude přibližovat

optimální hodnotě. Další výhodou metody je, že poskytuje vysoké napětí, které se zde objevuje už z principu Step-Up měniče. U optimálního odporu bylo dosaženo až 10 V. Vyšší napětí také může stát za vyšší efektivitou obvodu, protože úbytky na diodovém můstku mají menší vliv na ztráty.

Metodu je možné ještě dále zlepšit vyzkoušením použití jiných hodnot indukčnosti a tím pádem i změny středy spínacího signálu.

7 Shrnutí

V této práci jsem vyzkoušel tři vybrané obvody pro energy harvesting pomocí piezoelektrických měničů. Hodnoty výkonů všech tří obvodů se pohybovaly ve stejných úrovních a žádný z obvodů svým výkonem nějak velmi výrazně nepřevyšoval ostatní. Nejlepších výsledků bylo dosaženo pomocí obvodu Step-Up. Maximální výkon zde dosahoval při frekvenci 118 Hz skoro 0,21 mW. Další výhodou pro některé případy použití je vyšší výstupní napětí. To také způsobuje menší výkonové ztráty na usměrňovacích diodách.

Obvod SSHI v zapojení pomocí obvodu ADG412 podával skoro stejně dobré výsledky jako obvod předchozí. Napěťové zesílení zde nebylo takové, ale obvod dodával větší proudy a metoda dosáhla maximálního výkonu 0,2 mW. Nevýhodou metody SSHI hlavně pro její reálné použití je generování budícího signálu. Narozdíl od Step-Up metody, kde stačí budit spínací signál o neměnné frekvenci a střídě, zde musí spínat v přesně daném bodě kladné a záporné generované sinusovky. Spínací signál je vlastně fázově posunut od budícího signálu bimorfu. To znamená, že pro reálné nasazení tohoto obvodu bude potřeba ještě další, složitější a energeticky náročnější řídicí obvody, které budou analyzovat vstupní generovaný signál z piezoaktuátoru.

Bohužel se nepodařilo dosáhnout kvalitního výsledku u obvodu SSHI v zapojení s MOSFET tranzistory. Výkon zde dosažený se pohyboval okolo 0,11 mW, což je méně než výkon, který jsem naměřil u jednoduchého můstkového usměrňovače. Tyto výsledky měření mohou být ovlivněny chybou měření nebo spíše chybou v konstrukci obvodu a tím způsobení nepředvídaného chování obvodu. Určitě by se měla tato metoda ještě prozkoumat a bylo by dobré se pokusit o její vylepšení.

I obyčejný obvod s můstkovým usměrňovačem nepodával špatné výsledky. Maximální výkon zde dosahoval přes 0,13 mW a napětí kolem 2,3 V. Zásadní výhodou tohoto obvodu je v jednoduchosti jeho principu a že zde není potřeba žádné řídicí elektroniky, která sama většinou spotřebovává znatelnou část sklizené energie.

Ještě by zde mělo být uvedeno, že u metod, kde jejich obvody potřebují řídicí elektroniku, nebyla jejich spotřeba připočítána do porovnávaných výsledků. Pro reálné použití je třeba tuto energii počítat a měl by se klást snad ještě větší důraz na dobré

zvládnutí energetických požadavků těchto obvodů. Už kvůli tomu, aby nenastávaly případy, kdy by energy-harvesting nevyprodukoval ani tolik energie, kolik by bylo potřeba na jeho samotné řízení. Toto se sice zdá být samozřejmostí, ale ve velkém množství těchto publikací se s těmito energetickými výdaji vůbec nepočítá.

Podařilo se měřením a výpočty z parametrů datasheetu spočítat spotřebu úspěšných metod s integrovaným ADG412 obvodem. Vyšlo, že obvody pro svojí funkci spotřebovávaly 173 μW , to je na tento typ použitého piezoelektrický bimorfu velmi hodně, když si vezmeme, že je to kolem 80% maximální vyprodukované energie. Z toho vyplývá, že energeticky náročnější harvesting obvody by se vyplatili při použití většího počtu piezoelektrických bimorfů. Také se podařilo spočítat nábojovou dotaci ADG412 obvodů při spínací frekvenci 3 kHz, která je typická pro přechod elektronů z hradla gate na drain. Zjistilo se, že zde může až 0,5 V z celkové napětí patřit tomuto jevu. Tím je způsobeno zkreslení výsledků měření energie generované bimorfem. Samozřejmě, že tato energie se musí do řídicího obvodu nejdříve dodat, proto s ní nemůže počítat.

Integrovaný obvod ADG412 je zkonstruován pouze na spínání analogových signálů, ale protože piezo harvesting dodává malé výkony, může se zde takovýto obvod pro tento účel použít. Z toho ale plynou negativní vlastnosti tohoto spínání. Zásadním problémem obvodu ADG412 je fakt, že potřebuje pro svojí správnou funkci napájecí napětí vyšší než napětí spínaného signálu. Další negativní vlastnost je vyšší spínací odpor switchu. Spínací odpor by se dal snížit paralelním zapojením více spínačů, které by mohly být v tomto případě až čtyři. Na druhou stranu by se muselo nejspíše počítat s větší nábojovou dotací. Při spínání energy-harvestingu je problémem hlavně napětí, neboť se vyrábějí i lepší spínače s menším energetickou spotřebou, injektovaným nábojem a odporem, ale jsou určené pro malé napětí např. do 5 V.

8 Závěr

V bakalářské práci byla navržena a zkonstruována 3 zapojení elektronických obvodů pro energy-harvesting s využitím piezoelektrických měničů. Všechna 3 zapojení byla laboratorně vyzkoušena a porovnána. První, obyčejné usměrňovací zapojení, dokázalo generovat 0,13 mW výkonu. Vzhledem k velikosti bimorfu to byla očekávaná hodnota.

V druhém zapojení SSHI metody byly vyzkoušeny dva různé principy spínání cívky. První pokus s antiparalelním zapojením tranzistorů nebyl úspěšný. Chyba byla nejspíše ve špatné konstrukci a mohl se objevit problém s parazitními odvody energie ve formě injektovaného náboje s opačnou velikostí. Druhý způsob řešení spínače pomocí obvodu ADG412 už fungoval bez problému a bylo dosaženo úrovně 0,2 mW vyčerpaného výkonu.

Ve třetím zapojení byl vyzkoušen obvod, který se používá ve spínaných zdrojích pod označením Step-Up měnič. I v tomto obvodu byl na spínání použit elektronický integrovaný obvod ADG412. Tato metoda dosáhla největší hodnoty 0,21 mW. Další výhodou tohoto obvodu byla, že dokázal generovat větší napětí, což by se mohlo hodit některým speciálním zařízením.

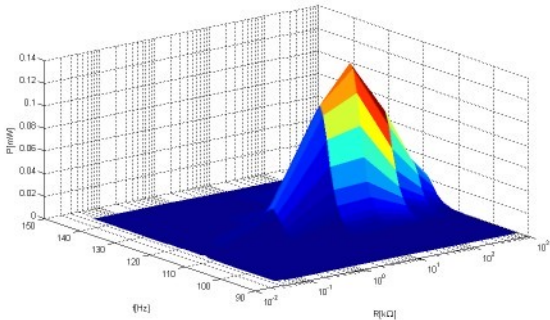
Před vyvozováním závěrů o úspěchu těchto metod je nutné si uvědomit, že do výsledného výkonu nebyly nezapočítány energetické spotřeby pokročilých elektronických obvodů 2. a 3. zapojení. Spotřeba byla změřena a spočítána pro zapojení se spínacím prvkem ADG412, na hodnotu 0,17 mW, což je 80% výkonu, které tyto metody produkují! To znamená, že za těchto podmínek při použití pouze jednoho bimorfu by se pokročilé metody vůbec nevyplatily. Vyvstává otázka, zda by vůbec samostatně dokázaly fungovat, protože v laboratoři byly potřebné řídicí signály generovány pomocí dalšího funkčního generátoru. Tyto generované energie řídicích signálů byly sice započítány do spotřeby, ale tato spotřeba by mohla být výrazně jiná v případě konstrukce soběstačného zařízení. Nejlepším východiskem by byla v tomto případě asi integrace obvodu a tím snížení ztrát ovládacích elektronických obvodů na minimum. Další nezbytná nutnost pro reálné využití piezo energy-harvestingu by bylo zapojení více piezokeramických bimorfů, které by dodávaly samozřejmě větší výkon.

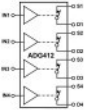
Ještě bych se měl zmínit o závislostech výkonu na frekvenci buzení pieza. Z výsledných grafů je vidět, že piezo energy-harvesting funguje jenom pro úzký rozsah frekvencí, který obklopuje rezonanční frekvenci bimorfu kolem 119 Hz. Každé vzdálení byť jenom o pár Hz od této frekvence znamená propady o desítky procent vyprodukovaného výkonu. Pro každou metodu byl nalezen ideální zatěžovací odpor, který je vhodné dodržovat, pokud by se mělo dosahovat zmiňovaných nejlepších výkonů. Neproázalo se výrazné posouvání rezonance bimorfu při změnách hodnot odporu R_z .

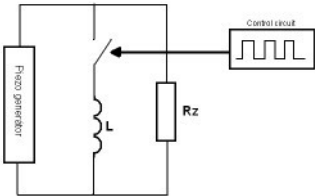
Piezo energy-harvesting s PZT keramikou má určitě budoucnost pro další výzkum. Je zde mnoho možností experimentování a vylepšování hlavně s pokročilými energy-harvestingovými obvody.

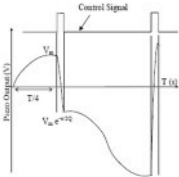
9 Seznam použité literatury

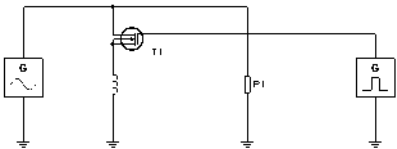
- [1] AMMAR, Yasser, BASROUR, Skandar. *NON-LINEAR TECHNIQUES FOR INCREASING HARVESTING ENERGY FROM PIEZOELECTRIC AND ELECTROMAGNETIC MICRO-POWER-GENERATORS*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 5 s. ISBN 2-916187-03-0.
- [2] ANTON S R, SODANO H A: *A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006)*. Center for Intelligent Material Systems and Structures, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [3] ERHART, Jiří. Piezoelektrické chytré materiály pro elektrotechniku. *Elektro*. 2002, č. 2, s. 4.
- [4] KREJČÍŘÍK, Alexandr. Spínané zdroje. *Amatérské radio*. 2000, č. 3, s. 3.
- [5] PULPÁN, Petr, ERHART, Jiří. Parametry piezoelektrických bimorfů. *Elektro*. 2002, č. 3, s. 4.
- [6] PUSTKA, Martin. *Frekvenční spektrum podélně polarizovaných rezonátorů z piezoelektrické keramiky*. [s.l.], 2005. 23 s. Dizertační práce.
- [7] *BS170 datasheet* [online]. 1992 [cit. 2009-05-26]. Dostupný z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS011379.PDF>>.
- [8] DI LC2MOS Precision Quad SPST Switches. *Analog Devices*. 2002, REV.B, s. 8. Dostupný z WWW: <http://www.analog.com/static/imported-files/Data_Sheets/ADG221_222.pdf>.
- [9] GENERAL PURPOSE 6-PIN PHOTOTRANSISTOR OPTOCOUPERS. *Fairchild semiconductor [online]*. 2002 [cit. 2002-06-06]. Dostupný z WWW: <<http://teslabs.com/meteotek08/fixers/datasheets/4N28.pdf>>.











PIEZO
GENERATOR



U



R_1



Generator pulsů

T1



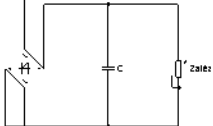
T2



R_2

D

L



Začes

FIELD
GENERATOR



U



Generator output



T1



T2



R_2

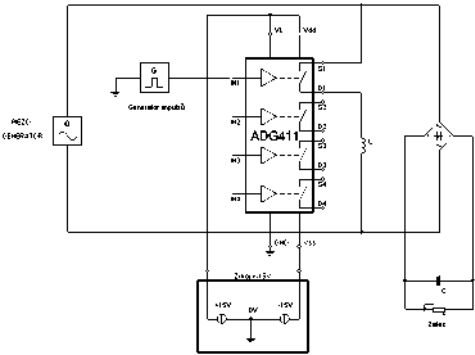
R_3

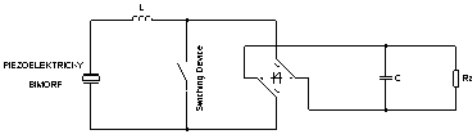
L

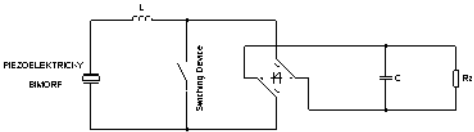
H

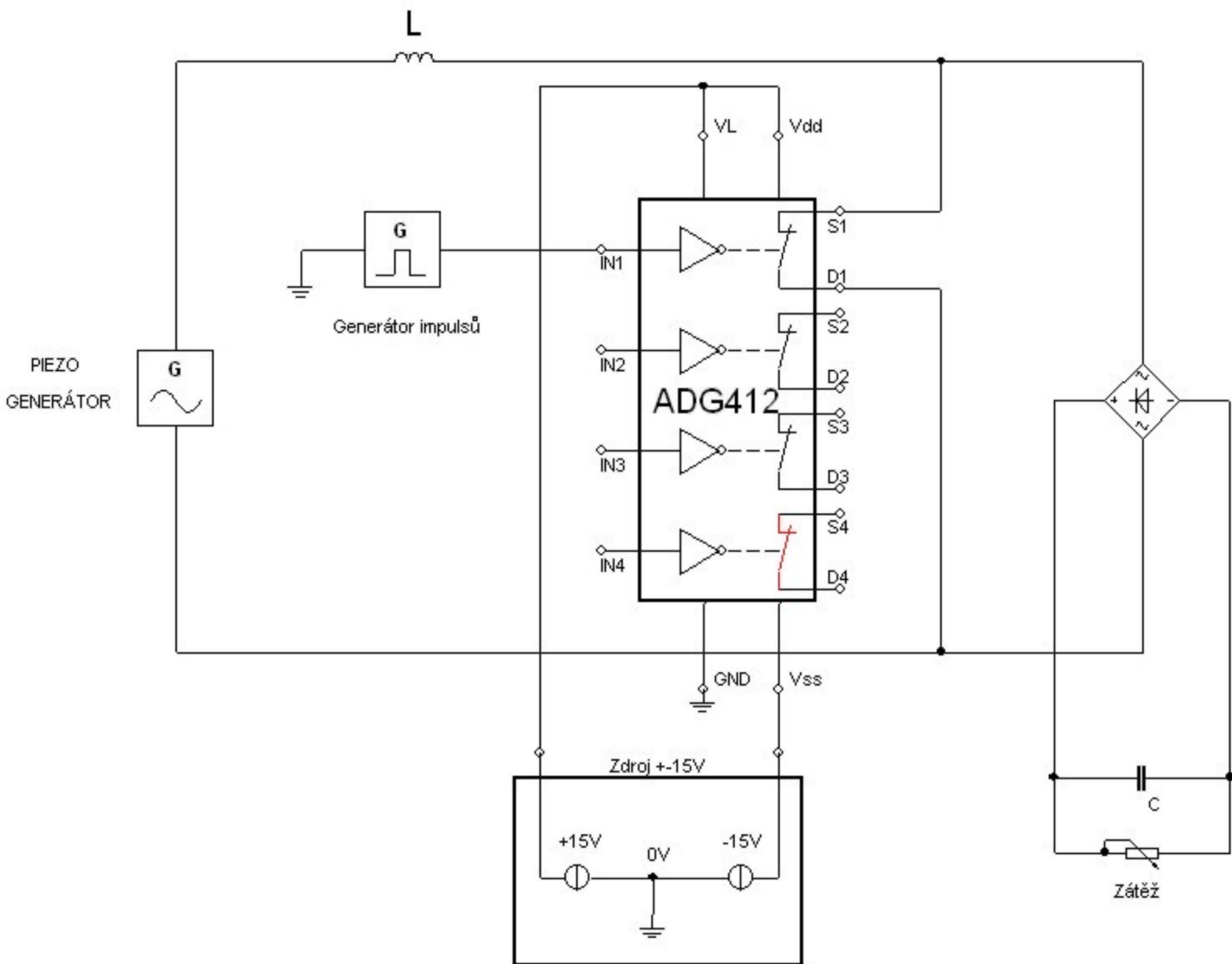
C

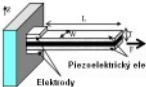
Index

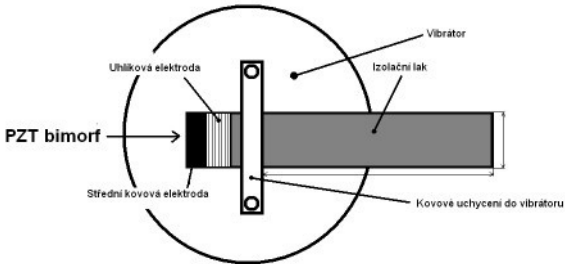


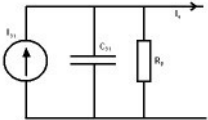




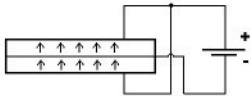




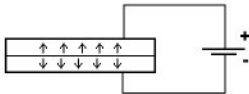




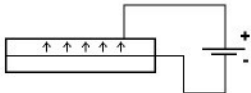
a)



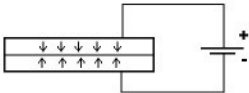
b)



c)



d)



GRAF