

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra teorie obvodů



Bakalářská práce

Charakterizace piezoelektrického generátoru energie pro
podporu napájení nositelné elektroniky

Characterization of a piezoelectric power generator to support
the power supply of wearable electronics

Autor: Jakub Šviga

Vedoucí práce: Ing. Adam Bouřa, Ph.D.

Studijní program: Lékařská elektronika a bioinformatika

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šviga** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **507806**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra teorie obvodů**
Studijní program: **Lékařská elektronika a bioinformatika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Charakterizace piezoelektrického generátoru energie pro podporu napájení nositelné elektroniky

Název bakalářské práce anglicky:

Characterization of a piezoelectric power generator to support the power supply of wearable electronics

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou piezoelektrických generátorů a se způsoby, jakými je lze využít k získávání energie z vibrací pro podporu napájení nositelné elektroniky [1, 2, 3].
2. Proveďte měření charakteristiky vybraného piezogenerátoru a odvoďte jeho mechanický a elektrický model.
3. Sestavte testovací pracoviště a proveďte měření piezogenerátoru při různém buzení vibracemi a odhadněte, jaké množství energie tak lze získat pro podporu napájení nositelné elektroniky. Výsledky měření kriticky zhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] C. Wei and X. Jing, "A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 1–18, 2017.
- [2] R. Mishra, S. Jain, and C. Durgaprasad, "Analysis of piezoelectric buzzers as vibration energy harvesters," in *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, 2016, pp. 1660–1664.
- [3] P. Dudhat, Q. Li, and S. Ren, "Ansys simulation of piezoelectric patch for energy harvesting," in *2019 ASEE Zone I Conference & Workshop*, 2019.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Adam Bouřa, Ph.D. katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **06.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Adam Bouřa, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24. května 2024

Jakub Šviga

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Adamu Bouřovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, podnětné komentáře a velmi vstřícný přístup.

Abstrakt

Tato práce se věnuje analýze piezoelektrických generátorů energie a jejich využití k napájení nositelné elektroniky. V teoretická částí práce jsou prezentovány vlastnosti piezoelektrických materiálů a současný stav vibračního energy harvesting. Praktická část se zabývá měřením charakteristik vybraného piezoelektrického generátoru, návrhem mechanicko-elektrického modelu a jeho experimentálním ověřením.

Klíčová slova: energy harvesting, piezoelektrický jev, vibrační generátor, elektrický model, nositelná elektronika

Abstract

This work focuses on the analysis of piezoelectric energy generators and their application in powering wearable electronics. The theoretical part of the thesis presents the properties of piezoelectric materials and the current state of vibration energy harvesting. The practical part deals with measuring the characteristics of a selected piezoelectric generator, designing a electromechanical model, and its experimental verification.

Keywords: energy harvesting, piezoelectric effect, vibration generator, electrical model, wearable electronics

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 8 |
| Cíle práce | 9 |
| 1. Stávající stav problematiky | 10 |
| 1.1. Energy harvesting | 10 |
| 1.2. Zdroje energie v prostředí | 10 |
| 1.3. Vibrační generátory | 12 |
| Elektrostatické vibrační generátory | 12 |
| Elektromagnetické vibrační generátory | 12 |
| Piezoelektrické vibrační generátory | 12 |
| 1.4. Piezoelektrika | 13 |
| 1.4.1. Piezoelektrický jev | 13 |
| 1.4.2. Curierova teplota | 14 |
| 1.5. Piezoelektrické materiály | 15 |
| 1.5.1. Piezoelektrická keramika | 15 |
| 1.5.2. Piezoelektrické polymery | 16 |
| 1.5.3. Piezoelektrické kompozity | 16 |
| 1.6. Konstrukce piezogenerátorů | 17 |
| 1.6.1. Kruhová membrána | 17 |
| 1.6.2. Vetknutý nosník | 17 |
| 1.7. Náhradní model generátoru | 18 |
| 1.7.1. Rezonanční frekvence | 18 |
| 1.7.2. Činitel jakosti | 19 |
| 1.8. Využití pro nositelnou elektroniku | 20 |
| 2. Modelování piezoelektrického generátoru | 21 |
| 2.1. Měření charakteristik | 21 |
| 2.2. Mechanický model | 23 |
| 2.2.1. Výpočet parametrů RLC | 23 |
| 2.3. Elektrický model | 25 |
| 3. Experimentální ověření piezogenerátoru | 26 |
| 3.1. Popis experimentu | 26 |
| 3.2. Výsledky měření | 27 |
| 3.3. Zhodnocení výsledků | 34 |
| Závěr | 35 |
| Použitá literatura | 36 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: Porovnání hustot výkonu energetických zdrojů v prostředí [3] | 11 |
| Obrázek 2: (a) Žádná piezoelektrická polarizace (b) Molekula při působení vnější síly (c) Polarizace na povrchu materiálu [5] | 13 |
| Obrázek 3: Dělení piezoelektrických materiálů [2] | 15 |
| Obrázek 4: Kruhová membrána [5]..... | 17 |
| Obrázek 5: Vetknutý nosník [5] | 17 |
| Obrázek 6: Příklad náhradního modelu piezogenerátoru [2] | 18 |
| Obrázek 7: Závislost impedance na frekvenci [10] | 18 |
| Obrázek 8: Šířka rezonančního pásma [12] | 19 |
| Obrázek 9: Piezoměnič KBIG1256 [13]..... | 21 |
| Obrázek 10: Modální analýza vetknutého nosníku..... | 21 |
| Obrázek 11: Měřící sestava..... | 22 |
| Obrázek 12: Graf závislosti normovaného napětí na frekvenci. | 22 |
| Obrázek 13: Mechanický model piezogenerátoru | 23 |
| Obrázek 14: Graf závislosti napětí na frekvenci..... | 24 |
| Obrázek 15: Ekvivalentní elektrický model připojený k zátěži..... | 25 |
| Obrázek 16: Elektrický model piezoelektrického generátoru připojeného k zátěži. | 25 |
| Obrázek 17: Schéma (vlevo) a zapojení přípravku (vpravo) | 26 |
| Obrázek 18: Zapojení elektrického modelu piezogenerátoru k měřicímu přípravku | 27 |
| Obrázek 19: Průběh měření z osciloskopu při frekvenci 62,9 Hz a amplitudě 37,5 mV. | 28 |
| Obrázek 20: Graf průběhu nabíjení kondenzátoru při frekvenci 62,9 Hz a amplitudě 37,5 mV. | 28 |
| Obrázek 21: Průběh měření z osciloskopu při frekvenci 62,9 Hz a amplitudě 75 mV. | 29 |
| Obrázek 22: Graf průběhu nabíjení kondenzátoru při frekvenci 62,9 Hz a amplitudě 75 mV. | 29 |
| Obrázek 23: Průběh měření z osciloskopu při frekvenci 63,4 Hz a amplitudě 44 mV. | 30 |
| Obrázek 24: Graf průběhu nabíjení kondenzátoru při frekvenci 63,4 Hz a amplitudě 44 mV. | 30 |
| Obrázek 25: Průběh měření z osciloskopu při frekvenci 63,4 Hz a amplitudě 88 mV..... | 31 |
| Obrázek 26: Graf průběhu nabíjení kondenzátoru při frekvenci 63,4 Hz a amplitudě 88 mV. | 31 |
| Obrázek 27: Průběh měření z osciloskopu při frekvenci 63,9 Hz a amplitudě 50 mV. | 32 |
| Obrázek 28: Graf průběhu nabíjení kondenzátoru při frekvenci 63,9 Hz a amplitudě 50 mV | 32 |
| Obrázek 29: Průběh měření z osciloskopu při frekvenci 63,9 Hz a amplitudě 100 mV. | 33 |
| Obrázek 30: Graf průběhu nabíjení kondenzátoru při frekvenci 63,9 Hz a amplitudě 100 mV. | 33 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1: Parametry mechanického modelu. | 24 |
| Tabulka 2: Naměřené hodnoty měření včetně spočítaných výkonů | 27 |

Úvod

Používání elektronických zařízení od přelomu tisíciletí rapidně vzrostlo a s pokrokem technologií nadále roste. Napájení těchto zařízení je často uskutečněno pomocí elektrických zásuvek nebo baterií. Zvýšené využívání neobnovitelných zdrojů, jako jsou baterie, má za následek značné znečištění prostředí. Baterie mají navíc omezenou životnost, která je obecně kratší než životnost elektronického zařízení. Kromě toho, že vyžadují časté dobíjení a výměnu, se mohou nacházet v těžko přístupných místech nebo jejich výměnou dochází k přerušení výrobního procesu.

Z tohoto důvodu se hledají nové zdroje energie a metody jejího získávání. V současné době mají velké využití energy harvestory, které mohou čerpat energii z různých energetických zdrojů, jako je tepelná energie, energie záření, mechanická a chemická energie. Perspektivní oblastí v energy harvesting je využití vibrací. Přeměna vibrací na elektrickou energii je možná několika způsoby, jedním z nich jsou piezoelektrické vibrační generátory, kterými se zabývá tato bakalářská práce.

Cíle práce

Cílem této práce je odvození mechanického a elektrického modelu vybraného piezoelektrického generátoru energie, sestavení testovacího pracoviště k experimentálnímu měření při buzení různými vibracemi a zhodnocení piezoelektrických generátorů jako zdrojů napájení nositelné elektroniky. Součástí práce je také teoretický rozbor principu a využití piezoelektrických materiálů.

1. Stávající stav problematiky

1.1. Energy harvesting

Energy harvesting zahrnuje jakoukoli metodu získávání energie z bezprostředního okolí a její přeměnu na užitečnou formu energie, nejčastěji elektrickou, která má být použita v těsné blízkosti svého zdroje. Tyto sběrače energie jsou zvláště výhodné v izolovaných nebo těžko dostupných oblastech, kde je dobíjení baterií z elektrické sítě nemožné a jejich výměna nepraktická. Energy harvestory se liší ve velikosti a složitosti. Jejich rozměry se pohybují od zařízení v mikroměřítku sloužících k napájení senzorů až po větší systémy schopné generování značného množství elektřiny. Jejich účinnost se odvíjí od použitých technologií a druhu zdroje energie.

Podkategorií energy harvestingu je energy scavenging. Ten zahrnuje zachycování energie, která je těžko předvídatelná a je buď dostupná pouze v krátkých dávkách nebo dlouhodobých emisích. Příkladem sběru této energie je koncept systému detekce vozidel ve venkovském nebo vojenském prostředí, napájeného vibracemi projíždějících vozidel. Tyto „sběrače“ by mohly ležet ladem roky a nespotřebovávaly by žádnou energii, dokud by nebyly potřeba. [1]

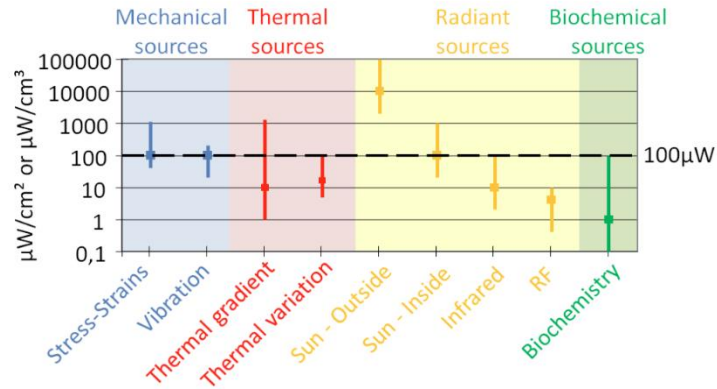
Technologie energy harvestingu mají využití v různých odvětvích, včetně bezdrátové komunikace, vzdáleného průzkumu, Internetu věcí a biomedicínských aplikací. Poslední z nich především ve formě nositelných senzorů, umožňujících sledování lidského zdraví a fyziologické výkonnosti pomocí neinvazivní, kontinuální a reálné analýzy lidských fyziologických parametrů. [2]

1.2. Zdroje energie v prostředí

V závislosti na aplikaci a množství potřebné energie mohou energy harvestory čerpat z různých ekologických zdrojů energie a to například [3]:

- Tepelná energie (teplotní gradient nebo variace)
- Energie záření (solární, infračervené, RF)
- Mechanická energie (vibrace, deformace, proudění vzduchu a kapalin)
- Chemická energie (chemie. Biochemie)

Tyto zdroje se vyznačují různou hustotou výkonu (obrázek 1.). Energy harvesting z venkovní solární energie je jednoznačně nejúčinnější. Bohužel sběr solární energie není možný v tmavých oblastech. A podobně není možné sklízet energii z tepelných gradientů tam, kde není rozdíl teplot, nebo sklízet vibrace tam kde žádné nejsou.



Obrázek 1: Porovnání hustot výkonu energetických zdrojů v prostředí [3]

Generátory využívající teplotního gradientu jsou označovány jako TEG – termoelektrický generátor, které k tvorbě elektrické energie využívají Seebeckův jev. Zajímavým typem termoelektrického generátoru je RTG (Radioisotope thermoelectric generator), který využívá tepla uvolněného z rozpadu radioaktivního materiálu. RTG je často přezdíváno nukleární baterie. RTG jsou lehké, kompaktní a mimořádně spolehlivé. To z nich dělá ideální energetické systémy pro vesmírné sondy a satelity.

V oblasti energy harvesting je pravděpodobně nejznámější a nejrozšířenější využití fotovoltaického jevu. Ten je aplikován jak v rozsáhlých solárních elektrárnách, tak v drobných elektronických zařízeních, jako je například kalkulačka. Jeho použití je však limitováno či kompletně nemožné v uzavřeném prostoru.

Pozoruhodný koncept jsou harvestory získávající energii z akustického vlnění. Výhodou je, že se akustické zdroje dají snadno kontrolovat. Problémem je ovšem nízká hustota zvukové energie. Ta je oproti ostatním zdrojům energie zanedbatelně malá. Další problém spočívá v geometrických rozměrech zvukového harvestoru. Pro práci se zvukem je výhodné, aby velikost elementu odpovídala vlnovým délkám zvuku. Ty jsou obecně větší než požadované a v praxi použitelné rozměry na harvestory. [4]

Přeměna mezi mechanickými vibracemi a elektřinou se již nějakou dobu používá v mikrofonech, reproduktorech, akcelerometrech, geofonech a seismografech [1]. Optimalizace této technologie pro získávání energie je však relativně nedávným vývojem a vibrace jsou v současnosti nejperspektivnějších oblastí v energy harvesting.

1.3. Vibrační generátory

Transformovat vibrace na elektrickou energii lze hned několika způsoby.

Elektrostatické vibrační generátory

Elektrostatické generátory jsou kapacitní struktury vyrobené ze dvou desek oddělených vzduchem, vakuem nebo libovolnými dielektrickými materiály. Relativní pohyb mezi dvěma deskami generuje změnu kapacity a poté elektrické náboje. Primární nevýhodou elektrostatických generátorů je, že vyžadují samostatný zdroj napětí pro zahájení, protože kondenzátor musí být nabit na počáteční napětí, aby proces přeměny mohl začít. Hlavní výhodou je jejich potenciál pro integraci s mikroelektronikou. Mají široké uplatnění například v technologiích MEMS.

Elektromagnetické vibrační generátory

K přeměně energie využívají principu Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Konverze elektromagnetické energie je výsledkem relativního pohybu elektrického vodiče v magnetickém poli. Typicky je vodič navinutý v cívce, aby se vytvořil induktor. Relativní pohyb mezi cívkou a magnetem způsobuje, že se na cívce indukuje proud. Design generátorů vychází ze dvou základních metod: v první je magnet pevně uchycen a cívka je pohyblivá, zatímco ve druhé metodě je cívka pevná a magnet se pohybuje. Druhý případ je výhodnější, neboť odpadá problém pohyblivých vodičů. Elektromagnetická implementace má několik významných silných stránek. Za prvé, pro spuštění procesu není potřeba žádný samostatný zdroj napětí jako u elektrostatické konverze. Za druhé, systém lze snadno navrhnout bez nutnosti mechanického kontaktu mezi díly, což zvyšuje spolehlivost a snižuje mechanické tlumení.

Piezoelektrické vibrační generátory

Piezoelektrický generátor ke své činnosti využívá piezoelektrické materiály, které mají schopnost generovat náboje, když jsou vystaveny deformaci a mechanickému napětí. Hlavní výhodou je jejich jednoduchá struktura, která umožňuje tvarovat generátory podle potřeby. Piezoelektrické materiály se v současné době komerčně využívají v senzorech, aktuátorech, a energy harvesting aplikacích. Návrh a modelování konstrukcí piezoelektrických generátorů je podrobněji popsáno v kapitole 1.6.

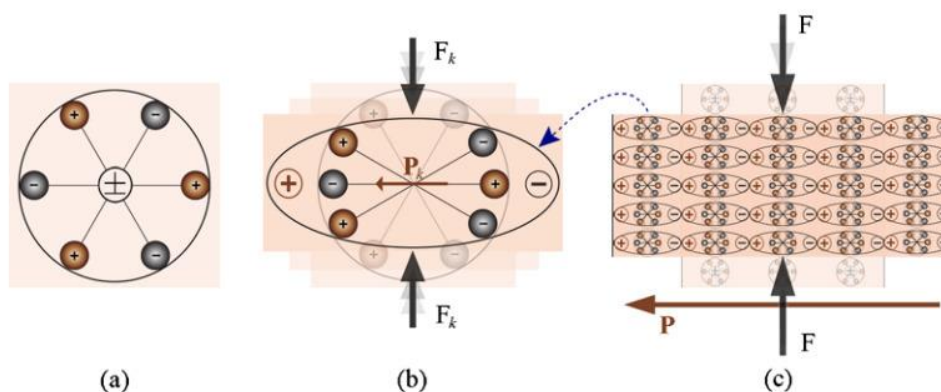
1.4. Piezoelektrina

První experimentální důkaz spojitosti mezi makroskopickými piezoelektrickými jevy a krystalografickou strukturou byl publikován v roce 1880 bratry Pierrem a Jacquesem Curieovými. Jejich experiment spočíval v přesném měření povrchových nábojů, které se objevovaly na speciálně připravených krystalech (turmalín, křemen, topaz), které byly vystaveny mechanickému napětí. Bratři Curieovi však nepředpověděli, že krystaly vykazující přímý piezoelektrický efekt by také vykazovaly opačný piezoelektrický efekt – mechanické napětí v reakci na aplikované elektrické pole. Tato vlastnost byla matematicky odvozena ze základních termodynamických principů Lippmannem v roce 1881. [8]

1.4.1. Piezoelektrický jev

Piezomateriály jsou speciálním typem dielektrik, které jsou v normálním stavu elektricky neutrální. Jejich krystalová mřížka je složena z pravidelně uspořádaných kladných a záporných iontů, které se vzájemně neutralizují. Mechanické namáhání deformuje krystal, což způsobuje posuny jednotlivých iontů a vytváření dipólů. Tím dochází k narušení vnitřní elektrické rovnováhy a na povrchu materiálu se objeví náboj. Na jedné straně materiálu se kladný náboj, na opačné straně záporný.

Tento proces je nazýván polarizace. Při polarizaci se vytváří elektrické pole, které ovlivňuje uspořádání volných nosičů náboje. Po připojení elektrod a vodičů k piezomateriálu začne nosičem proudit náboj. Tento proud trvá, dokud nedojde k neutralizaci polarizace. Jakmile mechanický tlak na piezomateriál ustane, polarizace se ztratí, a materiál se vrátí do svého původního elektricky neutrálního stavu.



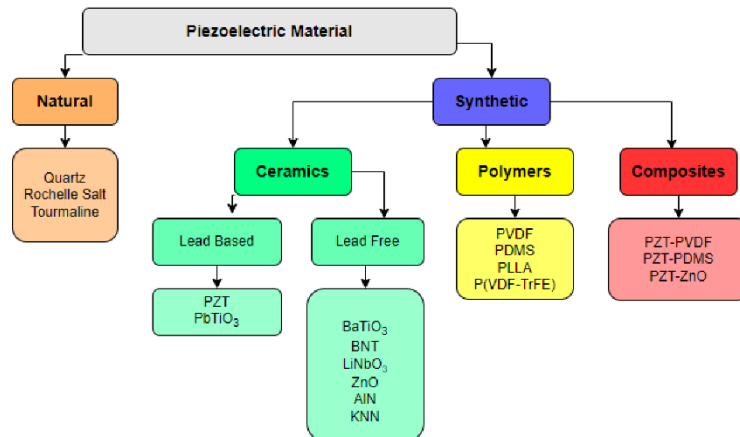
Obrázek 2: (a) Žádná piezoelektrická polarizace (b) Molekula při působení vnější síly (c) Polarizace na povrchu materiálu [5]

1.4.2. Curierova teplota

Pro každý piezoelektrický materiál existuje kritická teplota, známá jako jeho Curieův bod, která představuje jeho maximální provozní teplotu před trvalou a úplnou ztrátou piezoelektrické aktivity. V materiálu dojde k fázovému přechodu, přičemž se nesymetrická struktura krystalů změní na symetrickou, jednotlivé krystaly získají kubickou strukturu. V praxi musí být provozní teplota omezena na nějakou hodnotu podstatně pod Curieovým bodem, protože při zvýšených teplotách je depolace značně usnadněna, proces stárnutí se urychluje, zvyšují se elektrické a mechanické ztráty a snižuje se maximální bezpečné namáhání. Obecně platí, že za maximální bezpečnou provozní teplotu se považuje teplota rovnající se polovině Curieovy teploty. [9]

1.5. Piezoelektrické materiály

Piezoelektrické materiály mohou být jak přírodní, tak syntetické. Mezi přírodní piezoelektrické materiály patří křemen, turmalín a některé keramické materiály. Syntetické materiály zahrnují různé typy keramiky a polymerů. Tyto materiály se liší v závislosti na aplikacích, ve kterých jsou implementovány. V důsledku toho lze více než 200 piezoelektrických materiálů rozdělit do čtyř hlavních kategorií. [5]



Obrázek 3: Dělení piezoelektrických materiálů [2]

1.5.1. Piezoelektrická keramika

Piezoelektrická keramika je široce používána v různých aplikacích díky svým vynikajícím piezoelektrickým vlastnostem, robustnosti a stabilitě. Jedním z nejrozšířenějších používaných a prozkoumaných piezoelektrických keramických materiálů je titaničitan-zirkoničitan olovnatý (PZT). PZT často vybírá v několika aplikacích díky jeho vysoké přeměně mechanické energie na elektrickou energii. Díky Curieově teplotě materiálu 350 °C [5] může bezpečně fungovat i při vysokých teplotách. PZT je na druhou stranu nevhodný pro aplikace vyžadující flexibilitu. Kvůli svému vysokému Youngovu modulu pružnosti a hustotě je to obzvláště křehký materiál. Má proto velmi vysokou rezonanční frekvenci a nereaguje efektivně na nízkofrekvenční okolní vibrace. K jeho aplikacím patří například tlakové senzory, převodníky, piezoelektrické aktuátory a vysoce výkonná piezoelektrická zařízení. Vzhledem k environmentálním a lidským zdravotním důsledkům používání materiálů na bázi olova se výzkum zaměřil na vývoj bezolovnatých piezoelektrických materiálů. Oxid zinečnatý (ZnO) je v posledních letech jedním z nejúspěšnějších materiálů díky své schopnosti optimálně převádět mechanickou energii na elektrickou v mikro a nanoměřítku.[2]

1.5.2. Piezoelektrické polymery

Ačkoli jejich nízká hmotnost a flexibilita umožňují vynikající deformaci a absorpci napětí, piezoelektrické polymery mají nízkou mechanickou pevnost a piezoelektrické koeficienty. Mají také nízké Curieovy teploty, což výrazně omezuje rozsah jejich použitelnosti. V důsledku toho jsou považovány za neefektivní energy harvestory. Jedním z nejrozšířenějších piezoelektrických polymerů je polyvinylidenfluorid (PVDF). Zatímco některé jeho vlastnosti jsou mnohem horší než PZT, díky své vyšší pevnosti v tahu a nižší tuhosti může být atraktivní v určitých aplikacích, jako jsou nositelná zařízení, senzory a energy harvesting. [2,5]

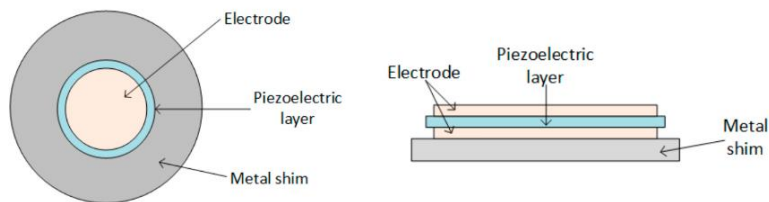
1.5.3. Piezoelektrické kompozity

Piezoelektrické kompozity mohou překonat čistě piezoelektrické materiály z hlediska mechanické pevnosti, odolnosti a pružnosti. Jsou to materiály složené z polymerní matice a piezoelektrického keramického plniva za účelem získání specifických mechanických a elektrických charakteristik. Tyto kompozity jsou určeny ke zlepšení nebo přizpůsobení výkonu piezoelektrických materiálů pro různé aplikace. Vědci mohou vyrábět kompozity s větší citlivostí, flexibilitou nebo jinými žádanými vlastnostmi pečlivým výběrem komponent a jejich pořadí. Piezoelektrické kompozity jsou rozděleny do dvou typů na základě zamýšlených materiálových charakteristik. Částicemi vyztužené kompozity jsou materiály, které obsahují piezoelektrické částice vložené do polymerní matice a používají se ke zvýšení mechanických a elektrických vlastností. Na druhé straně kompozity vyztužené vlákny poskytují silnější mechanické vyztužení a často se používají ve strukturálních aplikacích. PZT/PVDF je typickým příkladem piezoelektrického kompozitního materiálu polymer-keramika. Mnoho výzkumů zjistilo, že kompozity PZT/PVDF vykazují srovnatelnou flexibilitu jako nativní PVDF, přičemž mají větší piezoelektrický koeficient. [2]

1.6. Konstrukce piezogenerátorů

1.6.1. Kruhová membrána

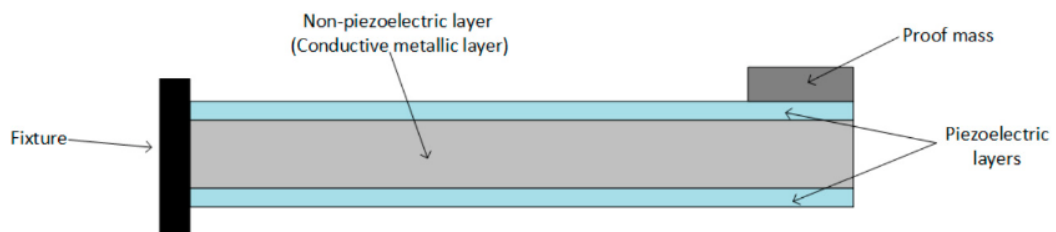
Membrána je tenká membrána, vytvořená z piezoelektrické vrstvy, která se používá k detekci nebo vytváření zvukových vln, tlaku nebo napětí. Skládá se z tenkého piezoelektrického disku, který je nasazen na kovovou desku, která má větší průměr než piezoelektrický disk. Ke středu membrány je připojena zkušební hmota, aby se zvýšil výstupní výkon a výkon při nízkých frekvenční provoz. Piezoelektrické membrány se běžně vyskytují v mikrofonech, reproduktorech, tlakových senzorech, snímačích síly a zařízeních pro detekci vibrací. Jsou považovány za svou citlivost, schopnost pracovat v širokém frekvenčním rozsahu a schopnost rychlé reakce. [2,5]



Obrázek 4: Kruhová membrána [5]

1.6.2. Vetknutý nosník

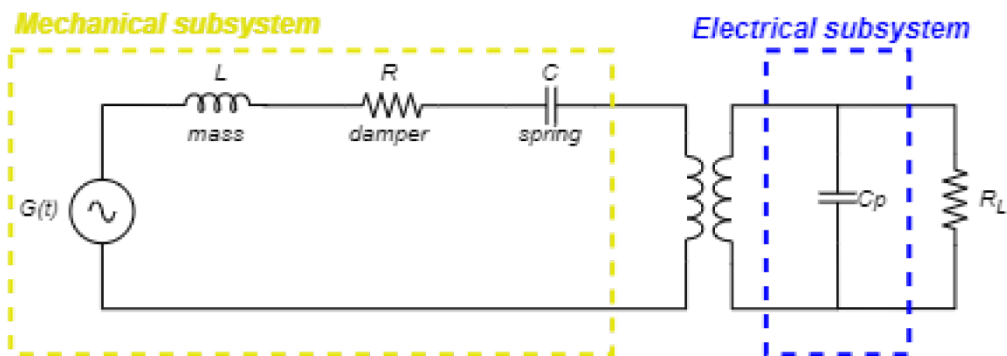
Ve většině aplikací jsou nejběžnější piezoelektrické sběrače energie nosníkového typu. Konstrukce s jedním koncem zapuštěným a druhým volným podporuje generování velkých napětí během buzení konstrukce na omezené základně. Konzolové nosníky mohou být unimorfní nebo bimorfní v závislosti na počtu piezoelektrických vrstev spojených s nosnou konstrukcí. Piezoelektrická fólie a vrstva kovové hmoty tvoří unimorfní druh. Na druhé straně bimorf má střední vrstvu kovového materiálu spojenou se dvěma vrstvami piezoelektrického materiálu na horním a spodním povrchu. Kromě toho může být na volný konec nosníku připevněna přídavná hmota pro zvýšení deformace a vyladění jeho rezonanční frekvence s ohledem na dostupný zdroj vibrací. [2,5]



Obrázek 5: Vetknutý nosník [5]

1.7. Náhradní model generátoru

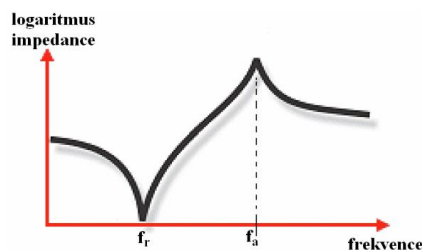
Piezelektrická zařízení jsou často integrována do větších elektrických a elektronických obvodů, které využívají jejich elektromechanické vlastnosti, ať už jde o přímý nebo obrácený piezelektrický jev. Z tohoto důvodu je nutné mít k dispozici náhradní elektrický model, který umožňuje začlenit piezelektrickou součást do obvodu a pomocí analytického vyjádření předpovídat jeho chování. Příklad ekvivalentního modelu je na obrázku 6.



Obrázek 6: Příklad náhradního modelu piezogenerátoru [2]

1.7.1. Rezonanční frekvence

Pro každý piezelektrický prvek lze najít frekvenci, při které vibruje nejsnáze a má největší účinnost přeměny elektrické a mechanické energie. Tato frekvence je označována jako rezonanční frekvence f_r . Při této frekvenci má piezelektrický prvek nejnižší impedanci. Opačný stav nastává při takzvané antirezonanční frekvenci f_a , při které impedance nabývá největších hodnot.



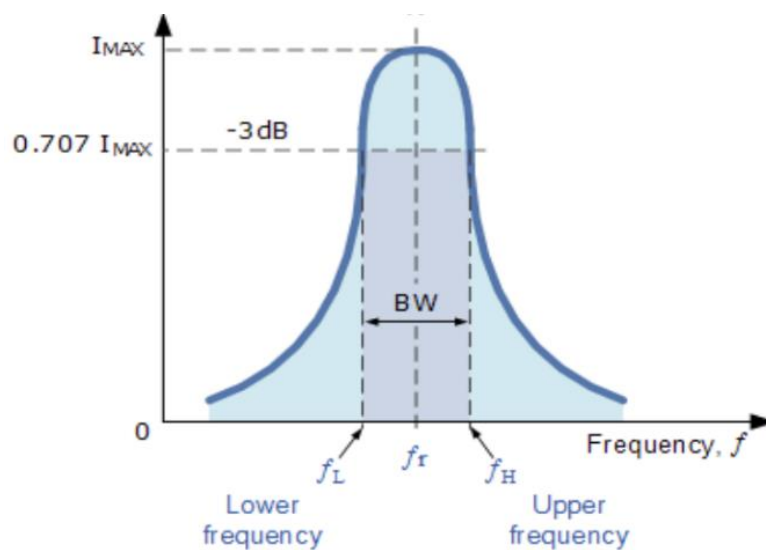
Obrázek 7: Závislost impedance na frekvenci [10]

1.7.2. Činitel jakosti

Činitel jakosti Q (Mechanical quality factor) je parametr, který popisuje rezonanční chování v náhradním zapojení při popisu piezokeramiky pomocí paralelně rezonančního elektrického obvodu [11]. Sinusově buzené rezonátory s vyššími činiteli jakosti rezonují v rezonanční frekvenci s vyššími amplitudami, ale mají menší rozsah frekvencí, pro které rezonují. Činitel jakosti je roven poměru rezonanční frekvence a šířky rezonančního pásma:

$$Q = \frac{f_r}{f_H - f_L}$$

Okrajové hodnoty šířky pásma f_H a f_L jsou definovány jako frekvence, kdy je napětí rovno útlumu -3 decibelů z maximálního napětí dosaženého v rezonanci. To je cca 0,7079 krát hodnota U_{max} . Hodnota -3 dB je často používána jako referenční bod pro šířku pásma v systémech, při kterém výkon klesá na polovinu své maximální úrovně.



Obrázek 8: Šířka rezonančního pásma [12]

1.8. Využití pro nositelnou elektroniku

Nositelná elektronika, zahrnující zařízení jako jsou chytré hodinky, fitness náramky a zdravotnické monitory, vyžaduje spolehlivé a trvalé udržitelné zdroje. Integrace piezoelektrických generátorů do těchto zařízení představuje řešení pro energetickou soběstačnost. Energie může být generována z tělesného tepla, chůze, respiračních pohybů a kolísání krevního tlaku. Malé množství energie generované z pohybu lidského těla může být dostatečné pro elektroniku s nízkou spotřebou.

Aplikace pro taková zařízení zahrnují monitorování těla, protetiku a ortotiku a přenosné elektronické systémy. Snímání tělesných funkcí je jednou z aplikací, která je důležitá pro biomedicínský průmysl. Jedná se o populární téma ve zdravotní péči a hodně výzkumného zájmu směřuje k návrhu nositelných zařízení s dlouhodobou efektivitou. [7]

2. Modelování piezoelektrického generátoru

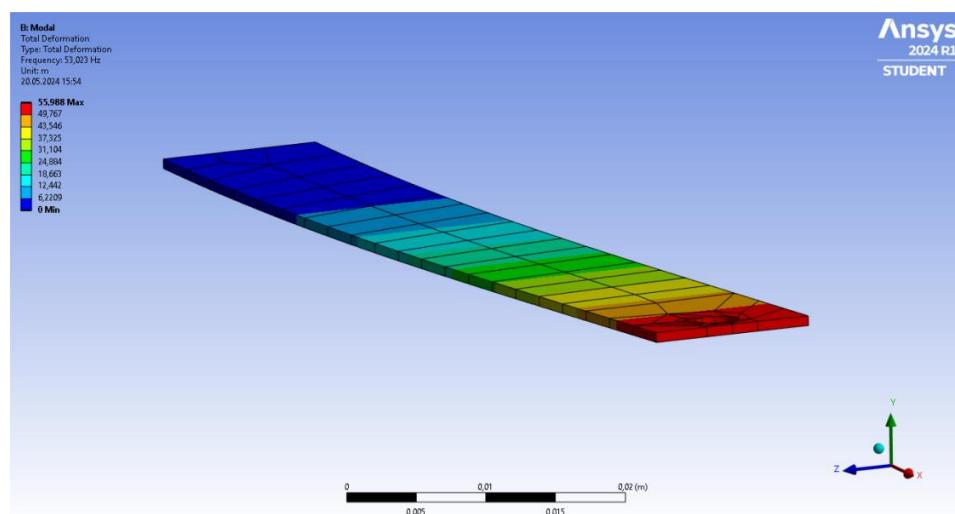
Jedním z cílů této práce bylo vytvoření náhradního mechanického a elektrického modelu vybraného piezoelektrického generátoru. Součástí práce nebyla konstrukce tohoto piezogenerátoru. Jedná se o vetknutý nosník s rozměry 85 x 12 x 0,66 mm (délka, šířka, tloušťka) a je převážně zhotovený z materiálu FR-4. Jedná se o kompozitní materiál složený z tkaniny ze skelných vláken sycené epoxidovou pryskyřicí, s dobrým poměrem pevnosti k hmotnosti. Piezogenerátor je tvořen ze čtyř sériově zapojených piezoměničů membránového typu KBIG1256 od firmy Kingstate. Ty jsou po dvojicích přilepeny na horní a spodní straně u báze nosníku.



Obrázek 9: Piezoměnič KBIG1256 [13]

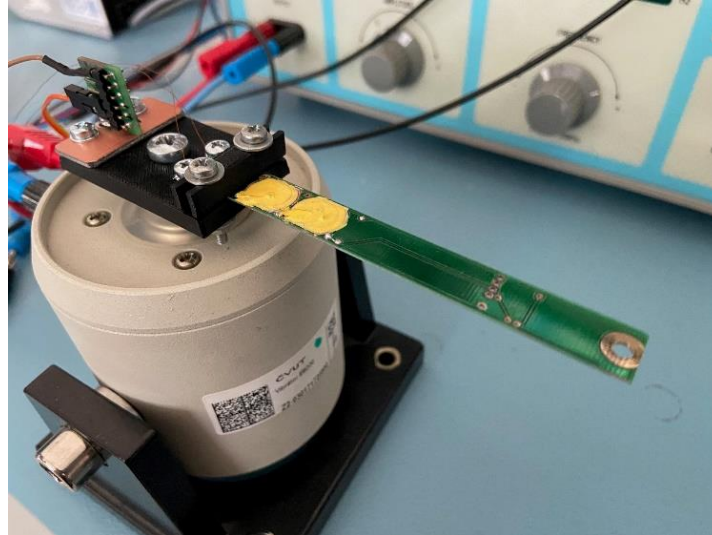
2.1. Měření charakteristik

K odvození mechanického modelu piezogenerátoru potřebujeme znát charakteristiku závislosti generovaného napětí na budící frekvenci, a to hlavně v oblasti rezonance. Pro odhadnutí rezonanční frekvence byl v programu ANSYS zjednodušený model vetknutého nosníku generátoru. Působením síly na konec nosníku došlo k tlumenému kmitání nosníku. Frekvence tohoto kmitání je rovna první rezonanční frekvenci. Modální analýzou (obrázek 10) vyšla první rezonanční frekvence 53 Hz.



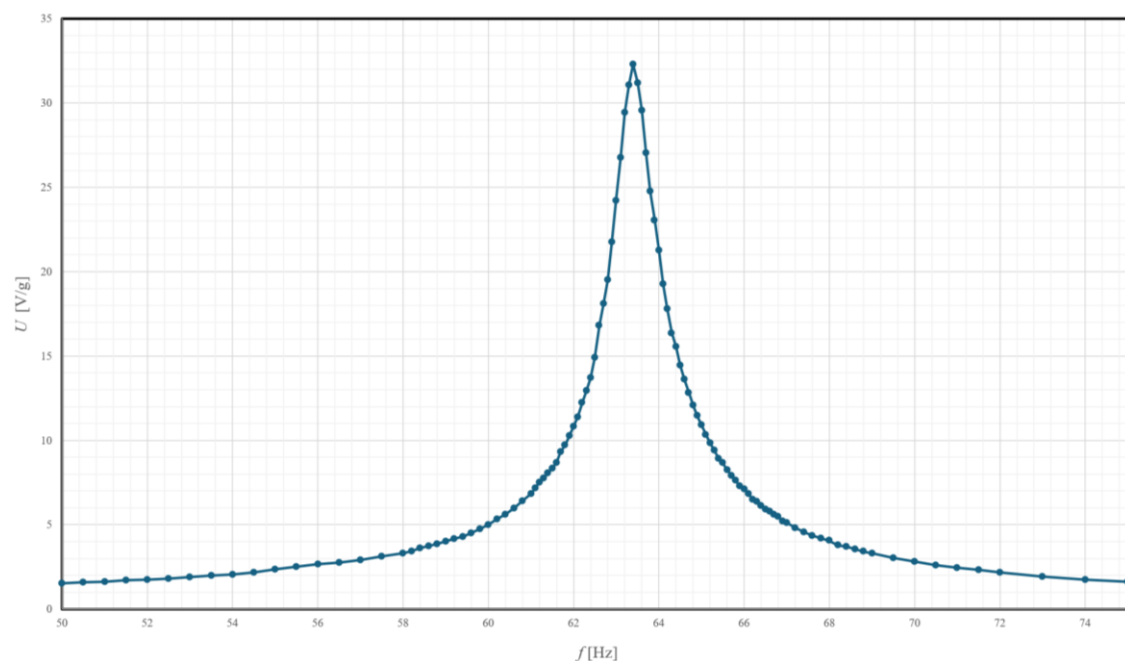
Obrázek 10: Modální analýza vetknutého nosníku

Piezogenerátor byl přimontován ke konstrukci upevněné na vibrátoru. Na konstrukci byl rovněž připevněn akcelerometr. Z elektrod piezogenerátoru a akcelerometru byl signál vyveden sondami na kanály osciloskopu, kde byl sledován napěťový průběh. Celá sestava je na obrázku 11.



Obrázek 11: Měřicí sestava

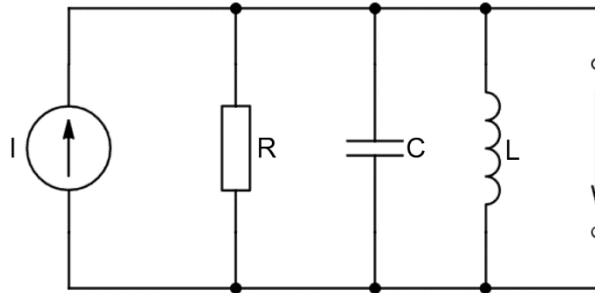
Změřená napěťovo-frekvenční charakteristiku okolo rezonanční oblasti piezogenerátoru je vykreslena na obrázku 12. Aby byla naleznuta frekvence, kdy generátor vyrábí nejvyšší napětí v poměru ke zrychlení vloženého vibračním systémem, byly hodnoty napětí naměřené akcelerometrem přepočítány z citlivosti uvedené v datasheetu [14] na jednotky zrychlení g. Výsledná rezonanční frekvence vyšla 63,4 Hz.



Obrázek 12: Graf závislosti normovaného napětí na frekvenci.

2.2. Mechanický model

Náhradní mechanický model piezoelektrického generátoru lze aproximovat pomocí paralelního RLC obvodu s proudovým zdrojem, kde jsou mechanické vlastnosti materiálu modelovány jako kombinace rezistoru, induktoru a kapacitoru, jak je znázorněno na obrázku 13.



Obrázek 13: Mechanický model piezogenerátoru

Rezistor reprezentuje mechanické ztráty v materiálu, jako je vnitřní tření nebo další disipativní jevy. Induktor modeluje hmotnost materiálu a jeho schopnost udržet kinetickou energii. Kapacitor odpovídá pružnosti materiálu a jeho schopnosti uchovávat potenciální energii.

2.2.1. Výpočet parametrů RLC

K rezonanci v paralelním RLC obvodu dochází, když se reaktivní účinky induktoru a kapacitoru vzájemně vyruší, což vede k čistě odporovému obvodu.

$$f_r: X_c + X_L = 0$$

Ke zjednodušení odvození mechanického modelu lze pevně stanovit buď hodnotu kapacitoru nebo induktoru. Já jsem zvolil velikost induktoru 1 H. Rezonanční frekvence obvodu je dána vztahem [11]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Z rovnice odvodíme vztah pro kapacitor:

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 L}$$

K určení hodnoty rezistoru potřebujeme znát činitel jakosti obvodu. Ten je roven poměru rezonanční frekvence a šířky rezonančního pásma. Okrajové hodnoty šířky pásma určujeme jako útlum -3dB z maximálního generovaného napětí, tedy napětí v rezonanční frekvenci. Pro výpočet hodnoty rezistoru platí [11]:

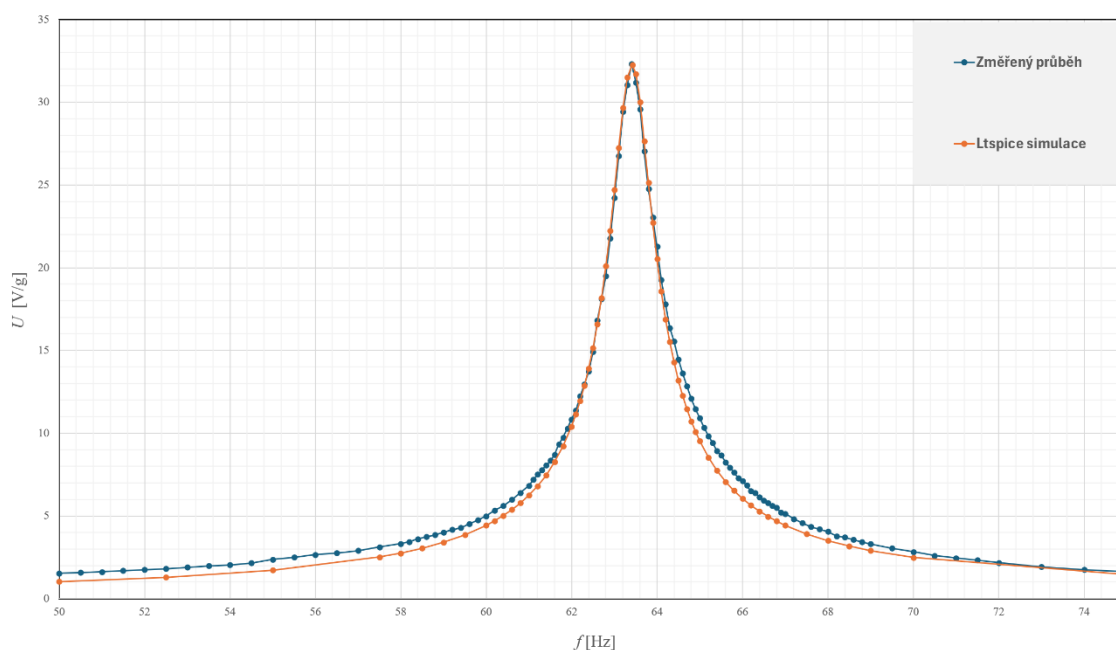
$$R = Q \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Hodnota proudového zdroje v obvodu je rovna proudu rezonanci. Tedy U/R . Všechny vypočítané parametry mechanického modelu piezogenerátoru jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Parametry mechanického modelu.

| | |
|------------------|-------|
| U_{out} [V] | 32,3 |
| L [H] | 1 |
| C [μ F] | 6,3 |
| R [Ω] | 26036 |
| Q [-] | 65,36 |
| I [mA] | 1,24 |

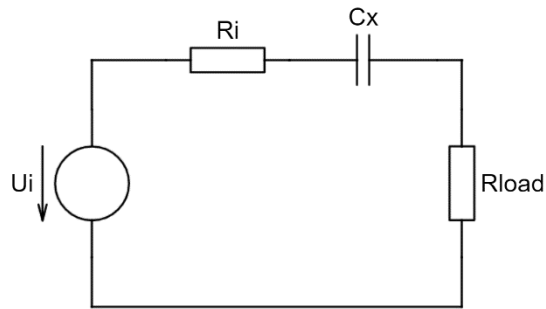
Náhradní mechanický model s vypočítanými parametry byl otestován simulací v programu LT Spice. Simulovaný průběh byl společně s reálným průběhem vykreslen do jednoho grafu. Z obrázku 14 můžeme pozorovat, že se reálný průběh s tím simulovaným téměř shoduje, a to hlavně v okolí rezonanční frekvence.



Obrázek 14: Graf závislosti napětí na frekvenci

2.3. Elektrický model

Elektrický model reprezentuje piezoelektrický generátor jako ekvivalentní obvod s piezoelektrickým zdrojem a kapacitorem. Mechanickou část lze nahradit jako Théveninovo ekvivalentní zapojení. Napěťový zdroj U_i a odpor R_i v zapojení na obrázku 15 budou mít stejné hodnoty jako v modelu mechanickém. Hodnotu kapacitoru bylo třeba spočítat z vnitřní impedance mechanického modelu připojeného na zátěž.



Obrázek 15: Ekvivalentní elektrický model připojený k zátěži.

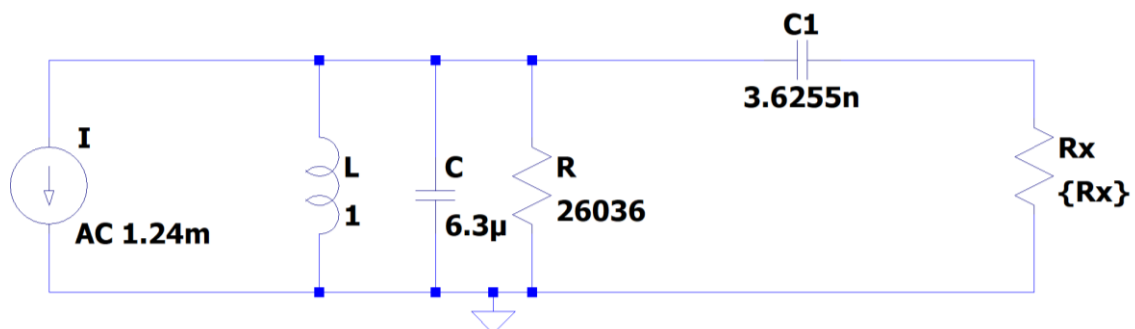
Pro napětí na zátěži platí vztah:

$$|U_o| = \left| U_i \frac{R_L}{R_L + R_i + \frac{1}{j\omega C_x}} \right|$$

Z této rovnice odvodíme vztah pro kapacitor:

$$C_x = \frac{U_o}{\omega \sqrt{U_i^2 R_L^2 - U_o (R_L + R_i)^2}}$$

K piezogenerátoru byla připojena zátěž R_L 47 k Ω , napětí na zátěži U_o bylo 2,19 V. Hodnota kapacity C_x vyšla 3.655 nF. Elektrický model jsem stejně jako v kapitole 2.2 analyzoval v LT spice (obrázek 16). Simulace opět odpovídala reálnému průběhu.



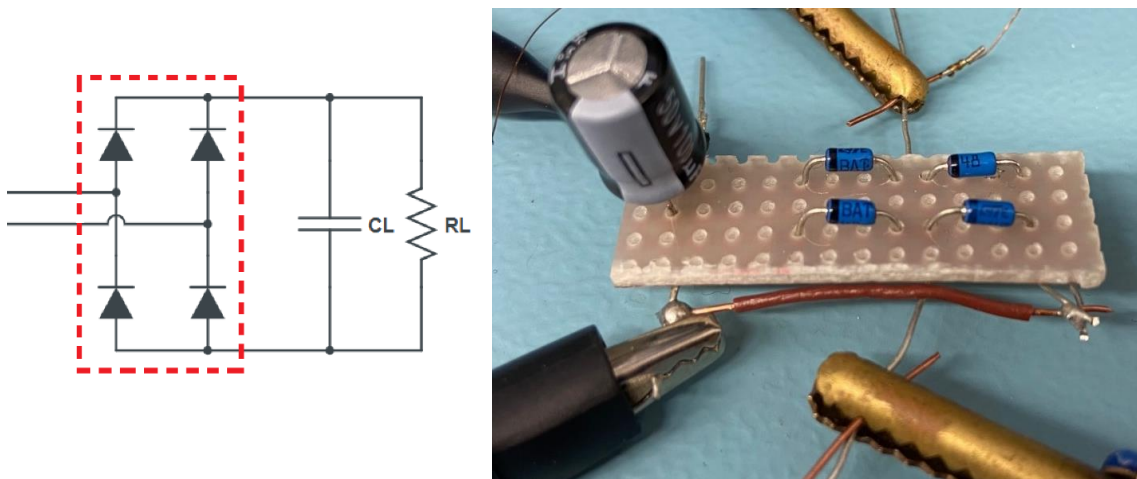
Obrázek 16: Elektrický model piezoelektrického generátoru připojeného k zátěži.

3. Experimentální ověření piezogenerátoru

Tato kapitola se zabývá praktickým proměřením vybraného piezoelektrického generátoru. Jedním z úkolů, které si klade za cíl tato bakalářská práce, je zjistit, do jaké míry je vhodné využívat piezogenerátory jako zdroj energie pro nositelnou elektroniku.

3.1. Popis experimentu

Pro experimentální měření dat byl navržen přípravek, který umožňuje jednoduché připojení výstupu z piezogenerátoru. Celý přípravek je tvořen kondenzátorem a čtyřmi diodami, zapojenými do usměrňovacího můstku. Střídavý výstup z piezoelektrického generátoru byl přiveden na můstek, který zabraňuje zpětnému pohybu náboje z obvodu do piezoelektrické vrstvy a usměrňuje proud. Tento sinusový usměrňovač urychluje nabíjení propojené kapacity. Má však značnou nevýhodu v tom, že její konverzní účinnost je nízká kvůli nemožnosti impedančního přizpůsobení a přímému poklesu napětí diody, což má za následek velkou ztrátu vedení a v důsledku toho snížení energie odebrané z piezoelektrického generátoru. Ke kapacitoru byla připojena sonda osciloskopu. Schéma a zapojení je zobrazeno na obrázku 17.



Obrázek 17: Schéma (vlevo) a zapojení přípravku (vpravo)

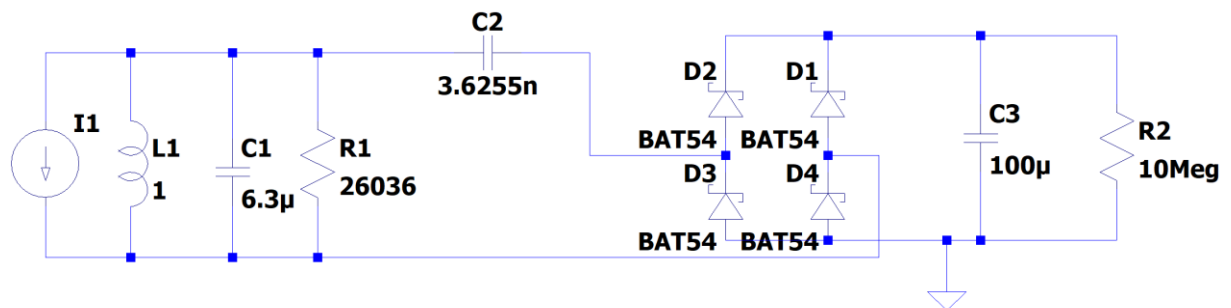
3.2. Výsledky měření

Celkem bylo uskutečněno šest měření pro různé frekvence a amplitudy. Byly vybrány frekvence, které definují rezonanční pásmo piezogenerátoru. Konkrétně pro 62,9 Hz, 63,4 Hz a 63,9 Hz. Pro každou frekvenci byla provedena dvě měření při různých amplitudách. Při měření bylo sledováno, na jaké napětí se nabije 100 μF kondenzátor za čas cca 200 vteřin. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Naměřené hodnoty měření včetně spočítaných výkonů

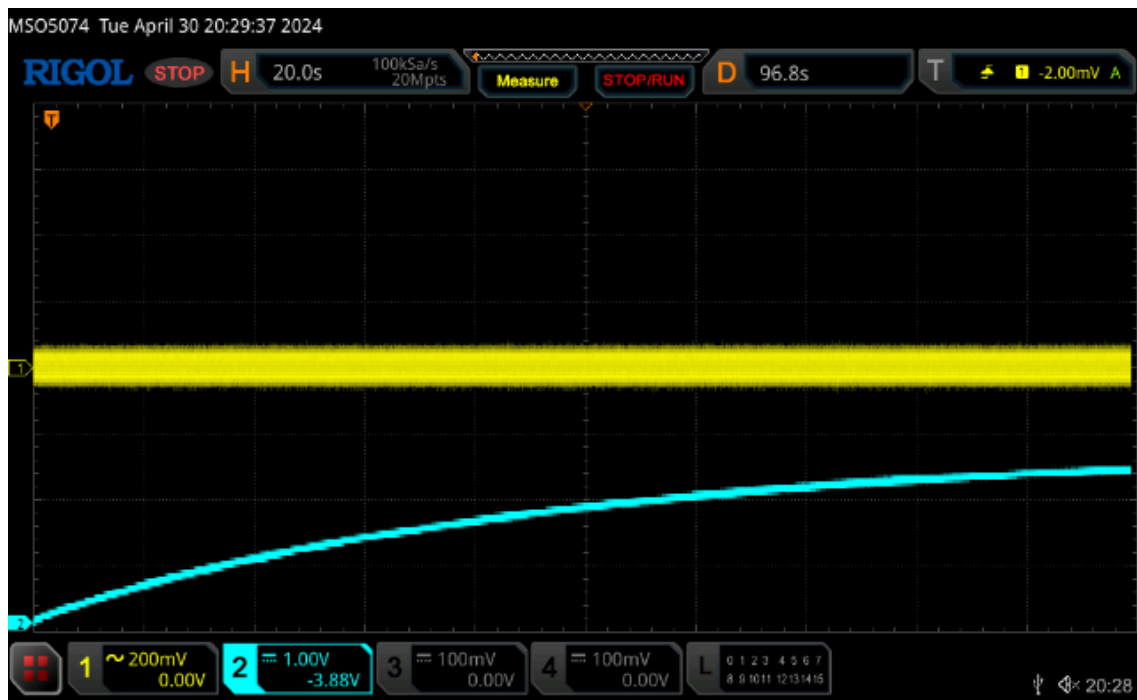
| | f [Hz] | Amp. [mV] | Amp. [g] | U [V] | P [μW] |
|----|----------|-----------|----------|---------|-----------------------|
| 1. | 62,9 | 37,5 | 0,0852 | 2,4 | 1,44 |
| 2. | 62,9 | 75 | 0,17 | 5,2 | 6,76 |
| 3. | 63,4 | 44 | 0,1 | 3,5 | 3,06 |
| 4. | 63,4 | 88 | 0,2 | 6,6 | 10,09 |
| 5. | 63,9 | 50 | 0,1136 | 2,6 | 1,69 |
| 6. | 63,9 | 100 | 0,227 | 4,6 | 5,29 |

Pro praktické ověření funkčnosti vytvořeného elektrického modelu z kapitoly 2, byl simulován průběh nabíjení kondenzátoru v programu LT Spice. Zapojení je na obrázku 18.

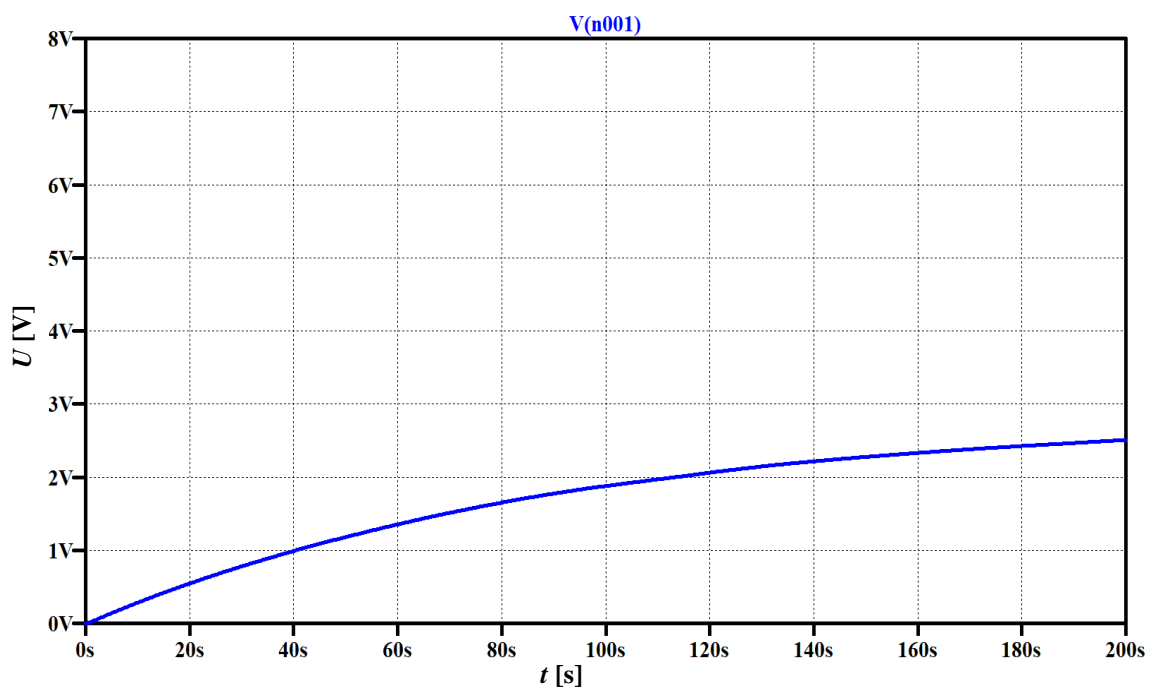


Obrázek 18: Zapojení elektrického modelu piezogenerátoru k měřicímu přípravku

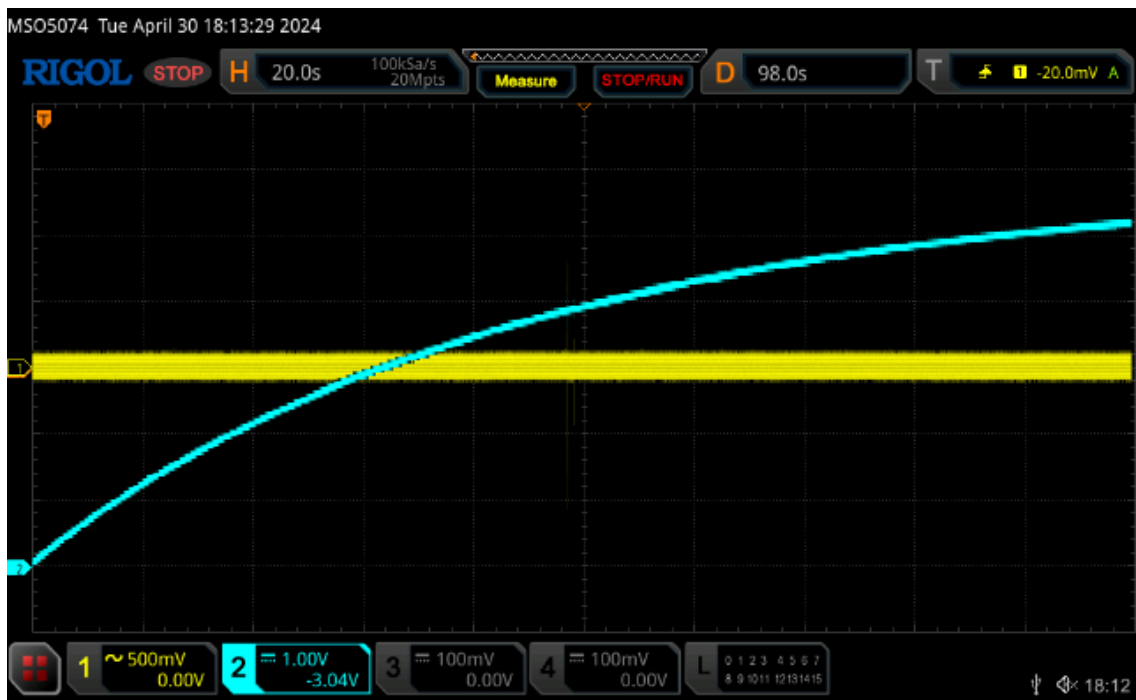
Na následujících obrázcích 19 až 30 jsou porovnány průběhy jednotlivých měření nabíjení kondenzátoru zaznamenaných osciloskopem s vytvořenými simulacemi. Porovnáním simulací a změřených reálných průběhů bylo ověřeno, že elektrický model je sestaven správně.



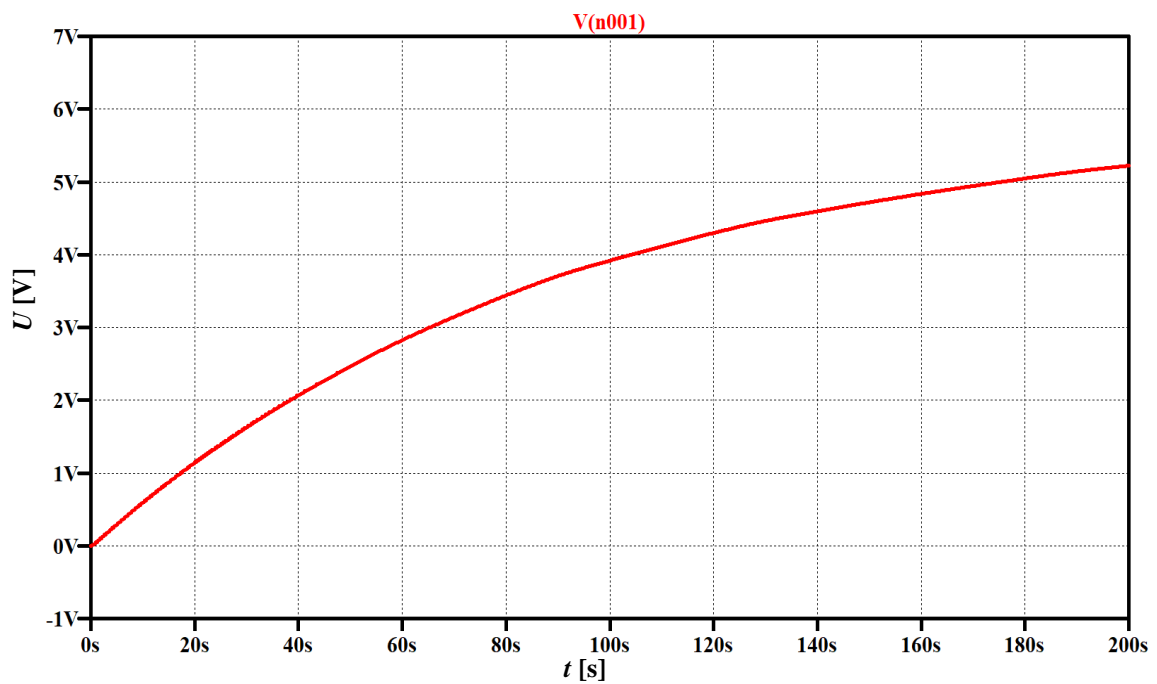
Obrázek 19: Průběh měření z osciloskopu při frekvenci 62,9 Hz a amplitudě 37,5 mV.



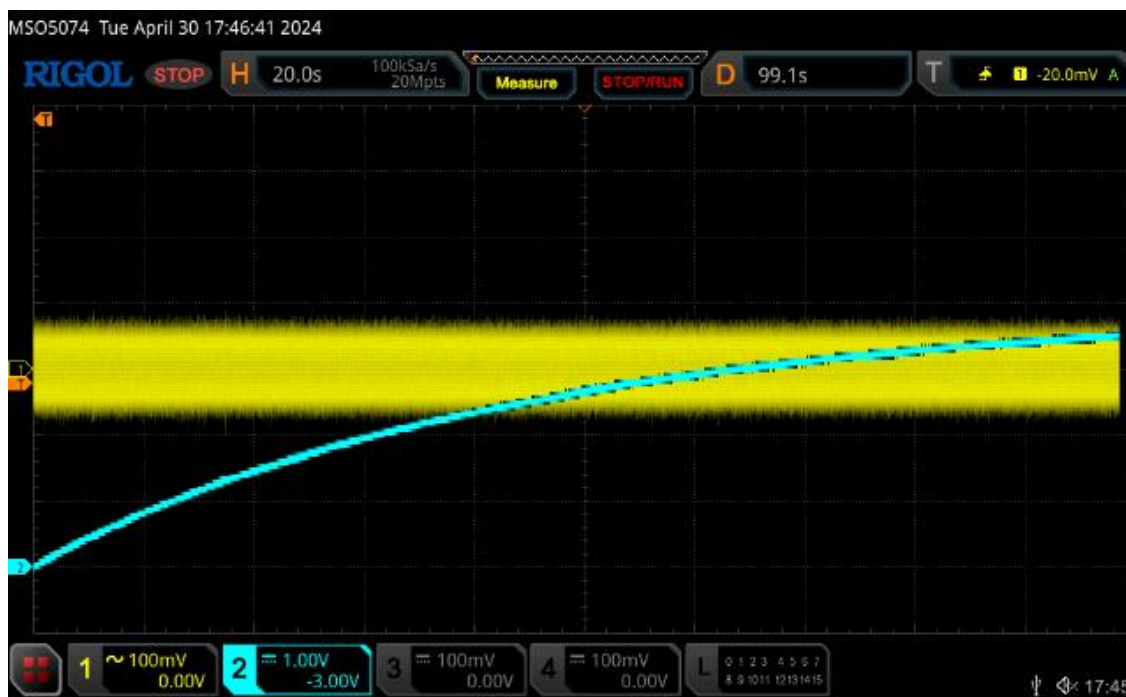
Obrázek 20: Graf průběhu nabíjení kondenzátoru při frekvenci 62,9 Hz a amplitudě 37,5 mV.



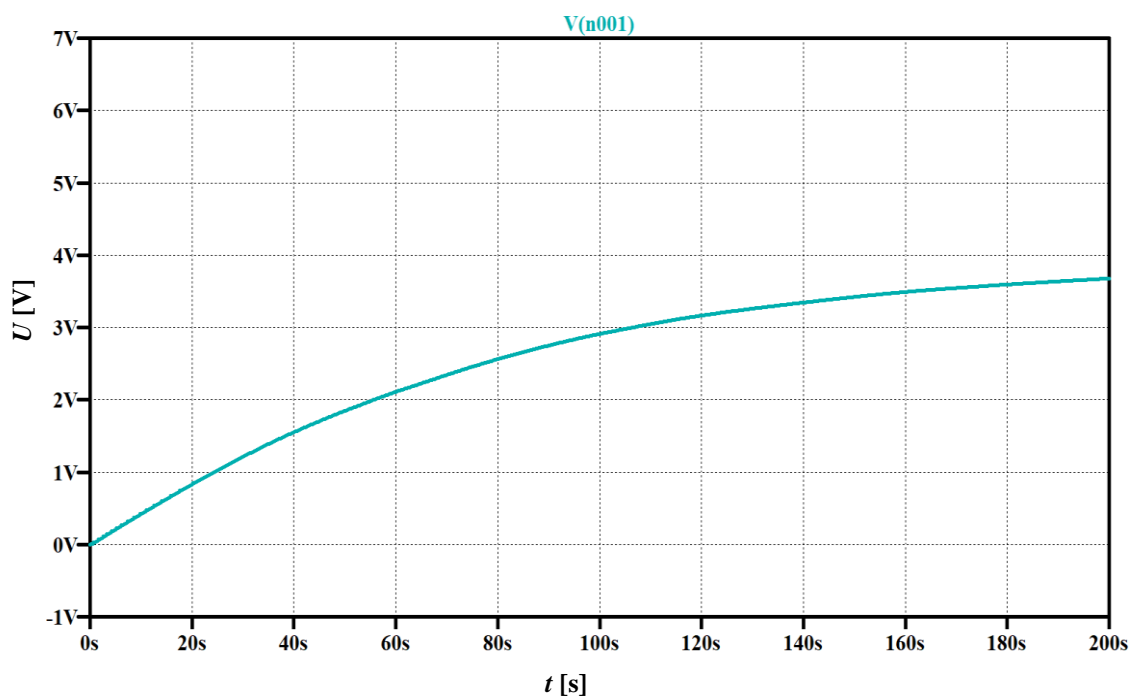
Obrázek 21: Průběh měření z osciloskopu při frekvenci 62,9 Hz a amplitudě 75 mV.



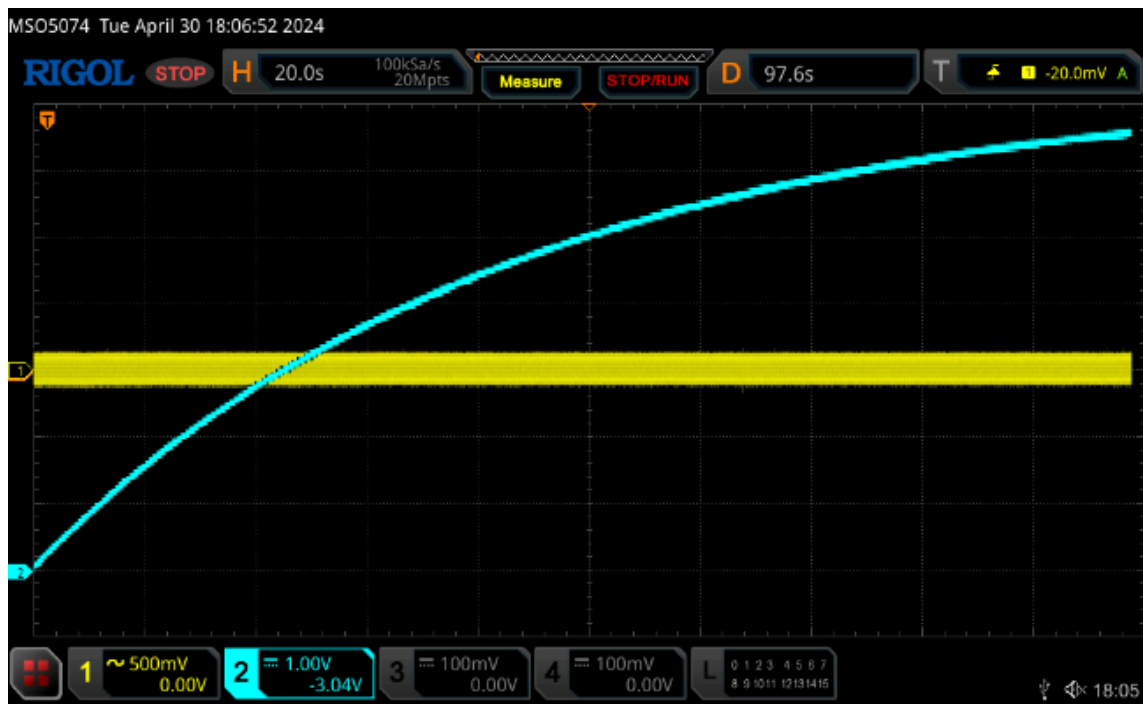
Obrázek 22: Graf průběhu nabíjení kondenzátoru při frekvenci 62,9 Hz a amplitudě 75 mV.



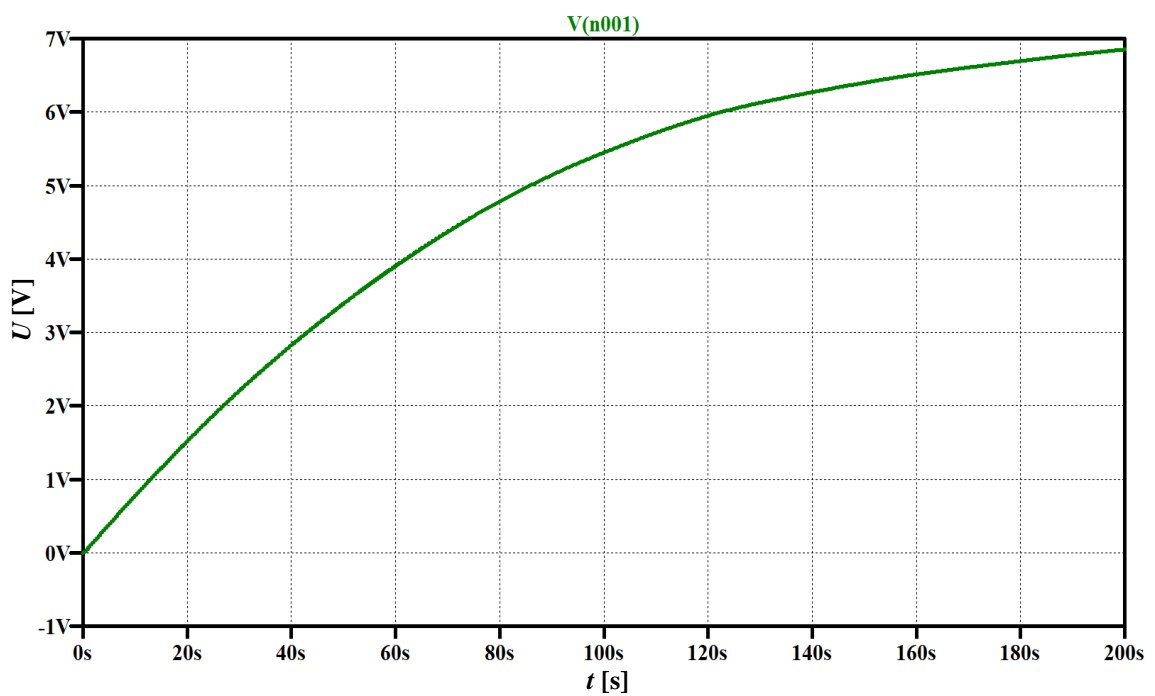
Obrázek 23: Průběh měření z osciloskopu při frekvenci 63,4 Hz a amplitudě 44 mV.



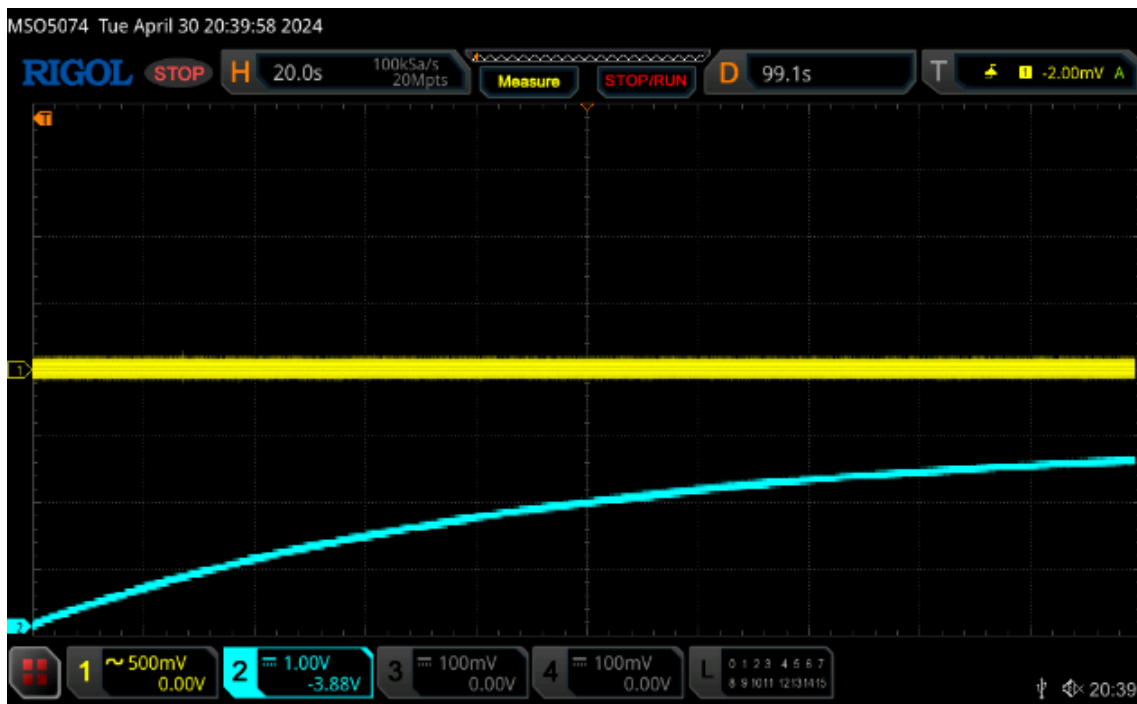
Obrázek 24: Graf průběhu nabíjení kondenzátoru při frekvenci 63,4 Hz a amplitudě 44 mV.



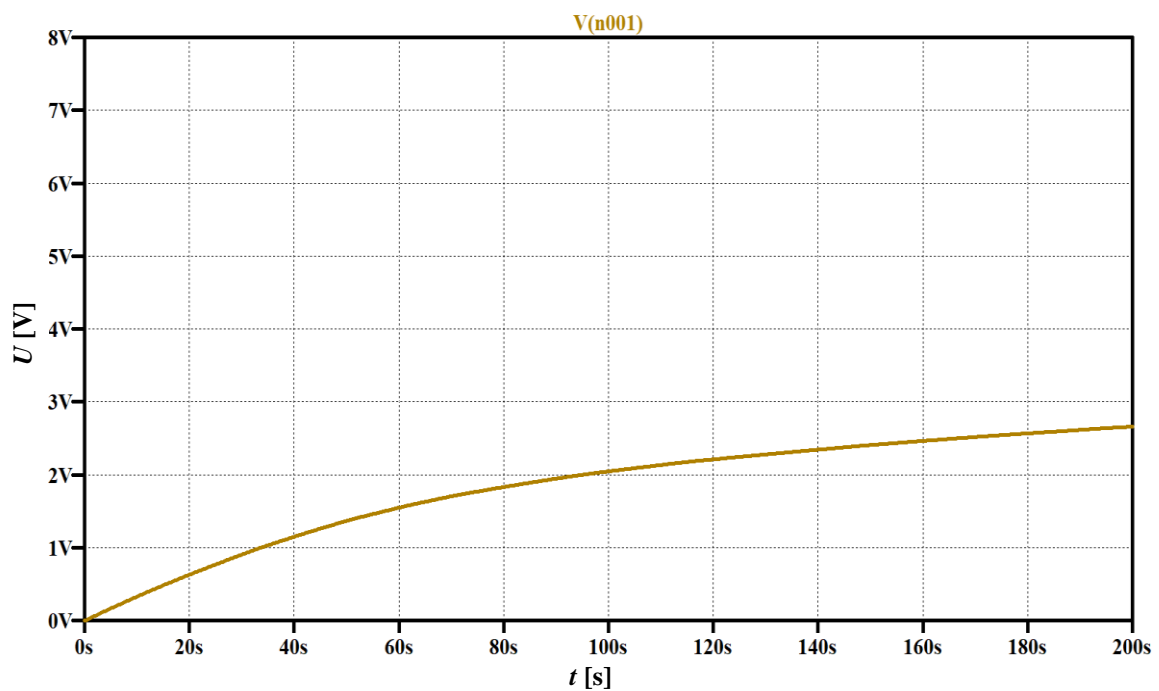
Obrázek 25: Průběh měření z osciloskopu při frekvenci 63,4 Hz a amplitudě 88 mV.



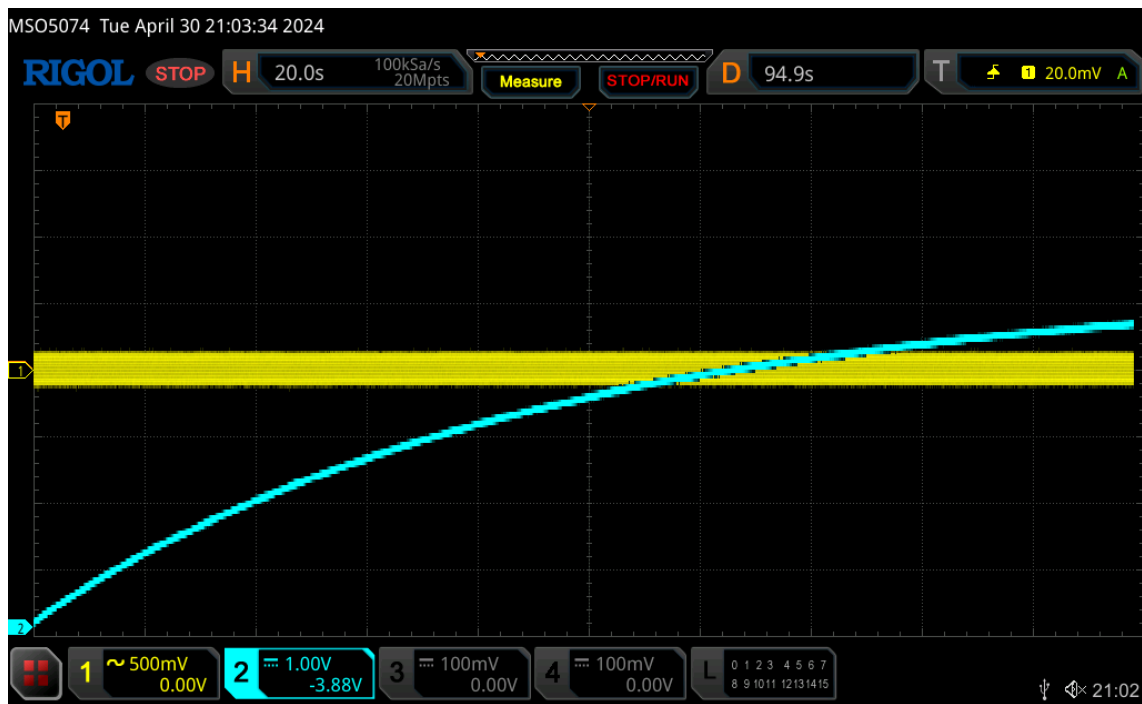
Obrázek 26: Graf průběhu nabíjení kondenzátoru při frekvenci 63,4 Hz a amplitudě 88 mV.



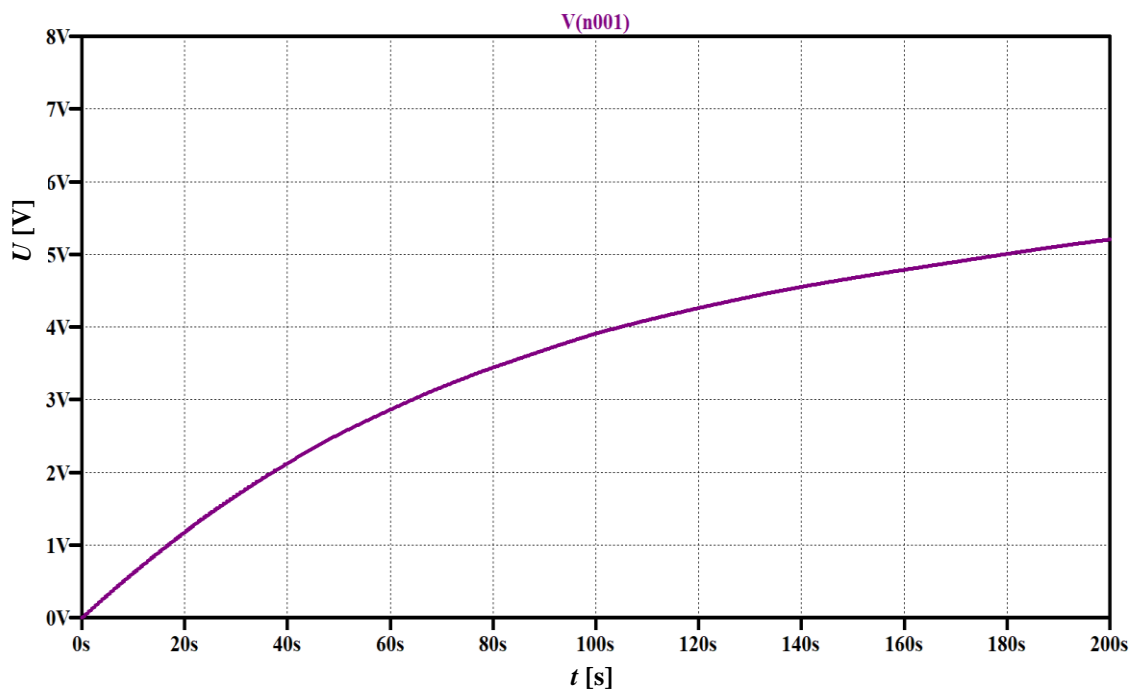
Obrázek 27: Průběh měření z osciloskopu při frekvenci 63,9 Hz a amplitudě 50 mV.



Obrázek 28: Graf průběhu nabíjení kondenzátoru při frekvenci 63,9 Hz a amplitudě 50 mV



Obrázek 29: Průběh měření z osciloskopu při frekvenci 63,9 Hz a amplitudě 100 mV.



Obrázek 30: Graf průběhu nabíjení kondenzátoru při frekvenci 63,9 Hz a amplitudě 100 mV.

3.3. Zhodnocení výsledků

Na základě testování bylo zjištěno, že generátor při harmonickém buzení rezonanční frekvencí (63,4 Hz) s amplitudou 0,2 g dosahoval maximálního výkonu o velikosti zhruba 10 μW . V reálném prostředí se harmonické vibrace běžně nevyskytují, tudíž by i výkon generátoru byl nižší.

Pro napájení současné nositelné elektroniky, například chytré prsteny od firmy Oura Ring [15], je zapotřebí výkonu v řádu mW. Z toho důvodu by testovaný generátor neposkytoval dostatečné množství energie. Navýšení výkonu generátoru spočívá ve zlepšení kvality materiálu, například využití nanostruktur. Také tvar a rozměr piezoelektrického prvku může výrazně ovlivnit jeho výkon. Pro aplikace v nositelné elektronice je potřeba dosáhnout miniaturizace piezoelektrických harvestrů. Další z možností navýšení generovaného napětí je zapojení více piezoelektrických prvků v sérii.

Závěr

Tato bakalářské práce se zabývá charakteristikou piezoelektrických generátorů pro získávání energie z vibrací a možnostmi jejich využití k napájení nositelné elektroniky. V teoretické části práce seznamuje s problematikou piezoelektrických generátorů. Popisuje obor energy harvesting, možnosti využití pro nositelnou elektroniku.

Praktická část je řešena ve dvou etapách. V první byla experimentálním měřením zjištěna napěťovo-frekvenční charakteristika vybraného piezogenerátoru. Z té byl odvozen jeho mechanický a elektrický model. V druhé etapě byla experimentálně ověřena funkčnost vytvořeného elektrického modelu.

Při posouzení generátoru pro tvorbu energie k napájení nositelné elektroniky byl generátor proměřen při různém buzení vibracemi. Maximální hodnota dosaženého výkonu při harmonickém buzení 0,2 g byla 10 μW . Získaná data umožňují lépe pochopit možnosti i omezení piezoelektrických generátorů v rámci nositelné elektroniky.

Piezoelektrický vibrační energy harvesting představuje atraktivní řešení pro energetickou soběstačnost nositelné elektroniky. Výhodou je jednoduchá konstrukce piezoelektrických prvků, obtíží je modelování generátorů kvůli disharmonickým vlastnostem přirozených vibrací v prostředí.

Do budoucna by bylo vhodné zaměřit se na zvýšení efektivity piezoelektrických materiálů a snížení energetické náročnosti nositelné elektroniky.

Použitá literatura

- [1] Dierks, Eric & Weaver, Jason & Wood, Kristin & Crider, Kendra & Jensen, Daniel. (2011). Energy Harvesting for Engineering Educators. ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings. doi: 10.18260/1-2--17846.
- [2] Brusa, Eugenio, Anna Carrera, and Cristiana Delprete. 2023. "A Review of Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Design, and Readout Circuits" *Actuators* 12, no. 12: 457. <https://doi.org/10.3390/act12120457>
- [3] S. Boisseau, G. Despesse and B. Ahmed Seddik, Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting, Small-Scale Energy Harvesting, Intech, 2012 doi: 10.5772/51360
- [4] V. Hruška: Akustický energy harvesting [Fyz. čtvrtek, FEL ČVUT], videozáznam přednášky 28. 5. 2022, <https://media.cvut.cz/cs/video/20220528-dr-v-hruska-akusticky-energy-harvesting-fyz-ctvrtek-fel-cvut>
- [5] Aldahiry DA, Bajaba DA, Basalamah NM, Ahmed MM. Piezoelectric Transducer as an Energy Harvester: A Review. *YJES*. 2022;19(1):30-35. doi: 10.53370/001c.33771.
- [6] Butt, Z.; Pasha, A.; Qayyum, F.; Anjum, Z.; Ahmad, N.; Elahi, H. Generation of electrical energy using lead zirconate titanate (PZT-5A) piezoelectric material: Analytical, numerical and experimental verifications. *J. Mech. Sci. Technol.* 2016, doi:10.1007/s12206-016-0715-3.
- [7] Zitouni, M. Sami & Wahbah, Maisam. (2022). Piezoelectric Energy Harvesting for Wearable and Implantable Devices. 92-96. doi: 10.1109/ICSPIS57063.2022.10002623.
- [8] The History of Piezoelectricity <https://piezo.com/pages/history-of-piezoelectricity>
- [9] Rob Carter, Richard Kensley, Introduction to Piezoelectric Transducers 2022, p. 20 <https://piezo.com/pages/intro-to-piezoelectricity>
- [10] Determining Resonance Frequency. APC International, Ltd. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezothory/determining-resonance-frequency.html>
- [11] J. Hospodka, Elektronické Obvody, interaktivní studijní materiál, 188-190 <https://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/soubory/ElektronickeObvody.pdf>
- [12] <https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/series-resonance.html>
- [13] <https://www.gme.cz/v/1502102/kingstate-kbig1256-piezomenic>

[14] MMA7341LC 3-Axis Accelerometer $\pm 3/9g$ with Voltage Regulator datasheet, dostupné z <https://www.pololu.com/product/1252/resources>

[15] <https://support.ouraring.com/hc/en-us/articles/360025428394-Product-Safety-Use>