

MEASUREMENT OF ENERGY HARVESTERS

Ondřej Kašpárek

Bachelor Degree Programme (3), FEEC BUT

E-mail: xkaspa41@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Jan Kunz

E-mail: xkunzj00@stud.feec.vutbr.cz

Abstract: This paper deals with energy harvesting based on piezoelectric principle and options of determining power parameters of piezoelectric energy harvesters. Purpose of the work is to depict one of possible methods in determining these parameters. Subsequently a system for measuring the generated voltage from piezoelectric energy harvesters under harmonic force signal in circuit with external load and a program for evaluating the measured data are put into operation.

Keywords: automatic test bench, energy harvester, harmonious excitation power, piezoelectric energy harvesters characterization, vibration energy harvesting

1 ÚVOD

Během vývoje v posledních letech se napěťové výstupy piezoelektrických energy harvesterů natolik zvýšily, že je můžeme považovat za perspektivní alternativu jiných způsobů energy harvesting. Proto je stále více nutná jejich dostatečná parametrizace, která by umožnila posouzení jejich vhodnosti pro integraci do elektronických obvodů, kde jsou baterie, kondenzátory či senzory. [1]

Energy harvesting je proces přeměny různých forem okolní energie na energii elektrickou, která může být poté použita k napájení jiných zařízení. Ve volném překladu tento pojem znamená získávání energie, ovšem v praxi se zpravidla využívá anglický výraz. Vývoj posledních let v této oblasti vedl k celé řadě různých mechanismů, které lze použít ke generaci elektrické energie z mnoha zdrojů, příkladem z tepelné, sluneční, deformační či setrvačné energie. Cílem je konstrukce takového systému (energy harvesteru), který by mohl zajišťovat přímý zdroj energie pro elektronická zařízení, doplňovat elektrochemické baterie či sloužit přímo k dobití baterií a kondenzátorů. [2] Vlastnost energy harvesterů dodávat udržitelný výkon do bezdrátového systému je atraktivní nejen z důvodu absence údržby baterií, ale i absence složitých kabelových systémů, což je relevantní zejména pro instalaci senzorových sítí v nehostinných nebo obtížně dosažitelných prostředích. [3]

Bohužel přehled výkonových parametrů pro vyhodnocení vhodnosti použití jednotlivých piezoelektrických přípravků v rámci energy harvesting není mnohdy výrobcem uváděn nebo zveřejněn. Z tohoto důvodu je hlavním cílem této práce vytvoření automatizovaného systému pro výkonovou parametrizaci piezoelektrických přípravků použitých pro energy harvesting.

1.1 PIEZOELEKTRICKÉ ENERGY HARVESTERY

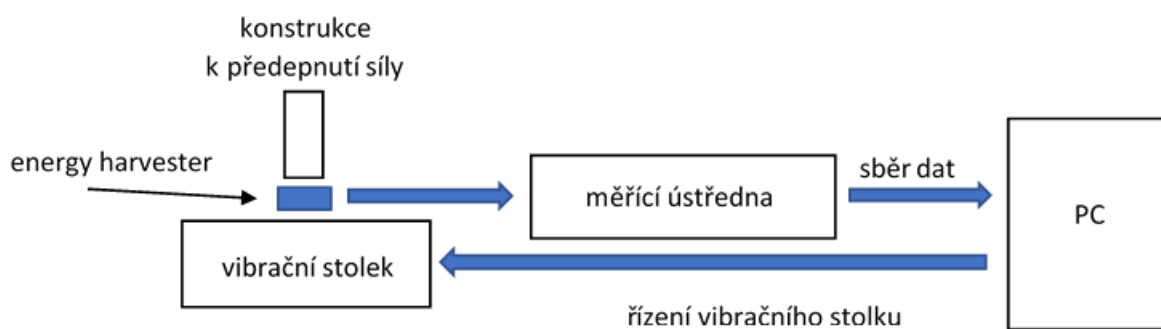
Pokud se zaměříme na energy harvesting vibrační energie, existují tři základní mechanismy pro přeměnu energie vibrací na elektrickou energii. Jsou to energy harvestery na elektromagnetickém, elektrostatickém a piezoelektrickém principu. [4] Piezoelektrické energy harvestery mají oproti dalším typům výhodu zavedených technologiích tenkých a tlustých vrstev, díky kterým se mohou vyrábět v makro i mikro měřítku. Další výhodou je absence vnějších napěťových nebo nábojových vstupů, které jsou například nutné pro generaci napětí energy harvestery založenými na elektrostatickém principu [4].

2 MĚŘENÍ PŘI ZATĚŽOVÁNÍ PIEZOELEKTRICKÝCH ENERGY HARVESTERŮ HARMONICKÝM SIGNÁLEM SÍLY

Určení výkonových parametrů energy harvesterů při jejich zatěžování harmonickým signálem síly spočívá v měření úbytku napětí na zátěži v zapojení, kdy energy harvester je zdrojem tohoto obvodu. Tento způsob měření slouží zejména k určení rezonanční frekvence a optimálního odporového zatížení, jelikož výkon dodávaný do obvodu energy harvesterem je závislý nejen na impedanci zátěže, ale i na frekvenci budícího signálu síly. [1] K výkonovému maximu z pohledu zátěže dochází, když se impedance zátěže blíží impedanci zdroje, tedy impedanci energy harvesteru, a proto je při tomto měření využita vnější zátěž. [5] Z frekvenčního hlediska dochází k maximálnímu výkonu energy harvesteru při specifické frekvenci (rezonanční frekvence), při jiných frekvencích výkon prudce klesá. [1] Z těchto důvodů je nutné určovat výkon energy harvesterů jako závislost na zátěži v obvodu a na frekvenci budícího signálu síly. Určení z napětí naprázdno a proudu nakrátko je nevhodné, jelikož neumožňuje porovnání jednotlivých piezoelektrických energy harvesterů z výkonového hlediska a dále jejich porovnání s jinými typy energy harvesterů. [1]

3 SYSTÉM PRO MĚŘENÍ VÝKONOVÝCH PARAMETRŮ PIEZOELEKTRICKÝCH ENERGY HARVESTERŮ PŘI HARMONICKÉM BUDÍCÍM SIGNÁLU

Systém pro měření výkonových parametrů piezoelektrických energy harvesterů při harmonickém budícím signálu je založený na zatěžování přípravku harmonickým signálem síly, který vzniká při vibraci armatury vibračního stolku (konkrétně byl využit vibrační stolec typu 11077 od firmy ROBOTRON-MESSELEKTRONIK). Pro zajištění neustálého kontaktu vibrující armatury a energy harvesteru je vytvořena konstrukce, která dále zajišťuje předepnutí síly. Vibrace jsou programově řízeny integrovaným kontrolérem NI cRIO-9067. Amplituda signálu síly je regulována PI regulátorem a po ustálení (chyba < 0,3%) je zahájen sběr dat měřicími kartami od firmy National Instruments. Karty komunikují s programovým prostředím LabVIEW, ve kterém je programově zajištěn sběr a zápis dat. Pro možnost měření úbytku napětí na různých odporových zatíženích je programem řízena měřicí ústředna Agilent 34970A zajišťující změnu zatěžujících odporů v rozsahu 10 k Ω až 10 M Ω s 10 vzorky na dekádu. Tímto způsobem je proměřen celý požadovaný frekvenční a odporový rozsah.



Obrázek 1: Systém pro měření výkonových parametrů piezoelektrických energy harvesterů při harmonickém budícím signálu

4 PROGRAM PRO VÝPOČET VÝKONOVÝCH PARAMETRŮ PIEZOELEKTRICKÝCH ENERGY HARVESTERŮ Z NAMĚŘENÝCH DAT

Program na zpracování naměřených dat nejdříve provádí kontrolu generovaného signálu síly, která je řešena výpočtem celkového harmonického zkreslení signálu síly. Tím je programově zkontrolováno, zda nevznikl v průběhu měření problém v upnutí přípravku, který by se projevil zavedením vyšších harmonických složek. Pokud jsou naměřená data validní, je pomocí frekvenční filtrace, která v případě harmonického signálu nejlépe potlačí šum, určena hodnota napětí generovaného

energy harvesterem. Pro minimalizaci chyby je použito Flat top okno, které je vhodné při výpočtu FFT sinusového signálu, kdy je důležitá přesnost určení amplitudy harmonických složek. [6] Ze znalosti generovaného napětí a zatěžovacího odporu je určen výkon harvesteru.

Výpočet rezonanční frekvence může být proveden pouze jako určení frekvence, při kterém dochází k výkonovému maximu pokud. To ale platí pouze v případě, že měření je provedeno s dostatečně jemným frekvenčním krokem. Činitel jakosti může být v případě dostatečně jemného frekvenčního kroku též určen pouze z naměřených dat. Pokud tomu tak není, musí být naměřený průběh proložen splinem. Toto proložení musí být vždy použito při určení optimálního odporového zatížení (odporové zatížení, při kterém dochází k výkonovému maximu) z důvodů velkých odporových kroků mezi jednotlivými měřeními.

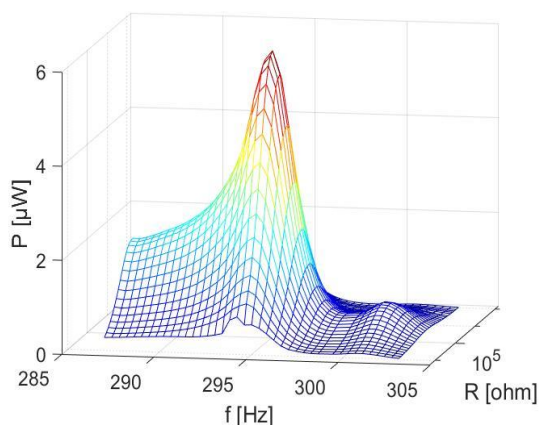
5 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Výše popsaným způsobem byly určeny výkonové parametry piezoelektrických prvků DT1-028K/L, DT1-052K, LDT1-028K a LDT2-028K, které jsou vypsané v následující tabulce 1.

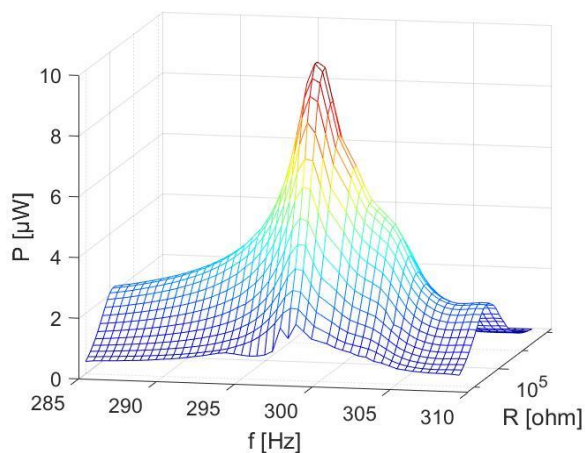
	DT1-028K/L	DT1-052K	LDT1-028K	LDT2-028K
Optimální odporové zatížení R_{opt} [k Ω]	248,6	248,6	-	143
Rezonanční frekvence f_r [Hz]	250	295	298	298
Činitel jakosti Q_m [-]	21,9	41,6	82,3	82,7
Maximální výkon P_{max} [μ W] k amplitudě signálu síly 1 N	0,5	0,9	12,3 (pro 10 k Ω)	1,4

Tabulka 1: Výkonové parametry proměřených piezoelektrických prvků

Ukázky naměřených závislostí výkonu na frekvenci budícího signálu a odporové zátěži přípravků DT1-052K a LDT2-028K jsou vyobrazeny na následujících obrázcích 1 a 2.



Obrázek 2: Výkon DT1-052K ve frekvenčním rozsahu 287-303 Hz při harmonickém signálu síly o efektivní amplitudě 4 N



Obrázek 3: Výkon LDT2-028K ve frekvenčním rozsahu 285-309 Hz při harmonickém signálu síly o efektivní amplitudě 4 N

6 ZÁVĚR

Při měření výkonových parametrů piezoelektrických energy harvesterů byl vytvořen a prozkoušen automatizovaný systém pro parametrizování piezoelektrických energy harvesterů při silovém působení. Tímto systémem může být určen výkon, rezonanční frekvence, optimální odporové zatížení a činitel jakosti. V rámci zkoušení funkcionality systému byly zjištěny odlišnosti frekvenčních průběhů jednotlivých energy harvesterů. Například piezoelektrický prvek DT1-028K/L má pozvolný výkonový nárůst do maxima, po kterém dochází k prudkému propadu výkonu. Oproti tomu u prvků LDT1-028K a LDT2-028K je strmost výkonového nárůstu přibližně stejná jako následného poklesu. Dále u prvku LDT1-028K nebyla zjištěna hodnota optimálního odporového zatížení, neboť programem nalezená hodnota byla nejmenší použitá hodnota externí odporové zátěže a není tedy zaručeno, že při zmenšování externího odporu již nebude docházet k odporovému nárůstu.

Piezoelektrické prvky DT1-028K1 a DT1-052K jsou vhodné pro energy harvesting při harmonických silách, jejichž spektrum obsahuje zejména frekvenční složky, které jsou nižší než příslušné rezonanční frekvence těchto prvků. Toto omezení naopak neplatí pro piezoelektrické prvky LDT1-028K a LDT2-028K. Tento fakt se odráží na činiteli jakosti, který je pro prvky LDT1-028K a LDT2-028K vyšší než u prvků DT1-028K1 a DT1-052K.

Optimální odporové zatížení u prvků DT1-028K1 a DT1-052K se pohybuje okolo 249 k Ω . Prvky LDT1-028K a LDT2-028K jsou vhodnější pro nižší odporové zatížení. Nejvíce vystupuje fakt, že optimální odporové zatížení prvku LDT1-028K je menší než nejmenší použitá hodnota odporu při měření, a to 10 k Ω . Díky tomu je vhodný jako jediný z proměřených piezoelektrických prvků pro použití při nízkých odporových zátěžích.

REFERENCE

- [1] BRISCOE, Joe, Nimra JALALI, Peter WOOLLIAMS, Mark STEWART, Paul M. WEAVER, Markys CAIN a Steve DUNN. Measurement techniques for piezoelectric nanogenerators. *Energy & Environmental Science* [online]. 2013, (6), 3035-3045 [cit. 2019-10-20]. DOI: 10.1039/c3ee41889h. ISSN 1754-5692. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c3ee41889h>
- [2] FEENSTRA, Joel, Jon GRANSTROM a Henry SODANO. Energy harvesting through a backpack employing a mechanically amplified piezoelectric stack. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2008, 22(3), 721-734 [cit. 2019-09-25]. DOI: 10.1016/j.ymsp.2007.09.015. ISSN 08883270. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327007001951>
- [3] BOWEN, C. R. a H. A. KIM. Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications. *Energy Environ. Sci* [online]. 2014, 7(1), 25–44 [cit. 2019-09-25]. DOI: 10.1039/c3ee42454e. ISSN 1754-5692. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2014/ee/c3ee42454e>
- [4] ERTURK, Alper a D. J. INMAN. *Piezoelectric energy harvesting*. Chichester: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-68254-8.
- [5] RUAN, Jinyu J., Robert A. LOCKHART, Pattanaphong JANPHUANG, Andres Vasquez QUINTERO a BRIAND. An Automatic Test Bench for Complete Characterization of Vibration-Energy Harvesters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. 2013, 62(11), 2966 - 2973 [cit. 2019-10-20]. DOI: 10.1109/TIM.2013.2265452. ISSN 0018-9456. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6553580/>
- [6] NATIONAL INSTRUMENTS. Understanding FFTs and Windowing [online]. [cit. 2019-12-22]. Dostupné z: <https://download.ni.com/evaluation/pxi/Understanding%20FFTs%20and%20Windowing.pdf>