



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ PARAMETRŮ ENERGY HARVESTERŮ

MEASUREMENT OF ENERGY HARVESTERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Kašpárek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Kunz

BRNO 2020



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Ondřej Kašpárek

ID: 203245

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Měření parametrů energy harvesterů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je navrhnout a zrealizovat systém pro měření parametrů piezoelektrických energy harvesterů při silovém působení. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

- 1) Seznamte se s vlastnostmi piezomateriálů a piezoharvesterů a zpracujte stručný přehled metod měření jejich parametrů při silovém působení.
- 2) Navrhněte a otestujte systémy pro měření výkonových parametrů energy harvesterů, použijte programovací prostředí LabVIEW.
- 3) Vytvořte program pro zpracování naměřených dat. Vytvořené programy popište a zdokumentujte.
- 4) Změřte výkonové parametry energy harvesterů v závislosti na různých veličinách (frekvence, amplituda, zatěžovací impedance, atd.).
- 5) Zpracujte naměřená data, výsledky vyhodnoťte a diskutujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Erturk A, Daniel J. Inman . Piezoelectric energy harvesting. 1. publ. Chichester: Wiley; 2011. ISBN 978-1-1-9-99116-8

VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. Začínáme s LabVIEW. Ilustroval Viktorie VLACHOVÁ. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Jan Kunz

Konzultant: Ing. Jiří Fialka, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

V posledních letech se výkonové výstupy piezoelektrických energy harvesterů zvýšily natolik, že konkurují jiným typům energy harvesting, a proto je nutná jejich dostatečná parametrizace. Pomocí dvou vytvořených systémů měření při silovém působení byly parametrizovány čtyři piezoelektrické PVDF fólie – DT1-028KL, DT1-052K, DT2-028K a LDT2-028K od SENZOR SOLUTIONS TE Connectivity. Výkonové výstupy fólií se pohybují v nW při zatížení harmonickým signálem síly o amplitudě 3 N_{rms} a přenesené energie při impulzu síly o velikosti 300 N se pohybují od stovek do desetin fJ. Dále byly určeny hodnoty činitele jakosti, rezonanční frekvence, optimálního odporového zatížení a stability maximálního výkonu.

Klíčová slova

piezoelektrický jev, energy harvester, harmonické silové měření, impulzní silové měření, PVDF

Abstract

Over recent years the power outputs of piezoelectric energy harvesters have increased to the point where they rival other types of energy harvesting and therefore their sufficient parameterization is necessary. Four piezoelectric PVDF films - DT1-028KL, DT1-052K, DT2-028K a LDT2-028K made by SENZOR SOLUTIONS TE Connectivity were parametrized by two created systems of measurement with force strain. Power outputs of these films when pressed with harmonic force signal with 3 N_{rms} amplitude are in nW and transferred energies after force impulse with size 300 N are between hundreds and tenths of fJ. Furthermore, values of quality factor, resonance frequency, optimal load resistance and maximal power stability were determined.

Keywords

piezoelectric effect, energy harvester, harmonic force measurement, impulse force measurement, PVDF

Bibliografická citace:

KAŠPÁREK, Ondřej. Měření parametrů energy harvesterů. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126991>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Jan Kunz.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření parametrů energy harvesterů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 7. června 2020

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Kunzi za trpělivé, pečlivé a odborné vedení během celé práce a za všechny jeho neocenitelné rady, které osvětlovaly mou cestu neznámem za vědomostmi a poznáním.

V Brně dne: 7. června 2020

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Piezoelektrický jev	2
2.1	Princip piezoelektrického jevu	3
2.2	Využití piezoelektrického jevu	3
2.3	Piezoelektrické materiály	4
3	Energy harvestery	5
3.1	Typy energy harvesterů	5
3.2	Piezoelektrické energy harvestery	6
4	Parametry piezoelektrických energy harvesterů	8
4.1	Piezoelektrická nábojová konstanta	8
4.2	Piezoelektrická napěťová konstanta	9
4.3	Permitivita	9
4.4	Elastický koeficient	10
4.5	Koeficient elektromechanické vazby	10
4.6	Youngův modul	11
4.7	Činitel jakosti	11
4.8	Rezonanční a antirezonanční frekvence	11
4.9	Ztrátový činitel	12
5	Metody měření parametrů piezoelektrických energy harvesterů	13
5.1	Měření při zatěžování energy harvesterů harmonickým signálem síly	13
5.2	Měření při zatěžování energy harvesterů impulzním signálem síly	14
5.3	Měření pomocí d ₃₃ -metru	15
5.4	Měření pomocí impedančního analyzátoru	16
6	Systém měření výkonových parametrů při harmonickém budícím signálu	17
6.1	Popis použitých přístrojů a jejich funkcionalita v rámci systému měření	18
6.1.1	Vibrační stůl ROBOTRON-MESSELEKTRONIK Typ 11077	19
6.1.2	Snímač síly Bruel & Kjaer 8200	20
6.1.3	Měřicí ústředna Agilent 34970A	20
6.1.4	Kanál pro měření síly	20
6.1.5	Nábojový zesilovač KISTLER 5015	21
6.1.6	Hardwarová část ovládající vibrační stůl	21
6.2	Softwarová část ovládání vibračního stolku a sběr dat	21
6.3	Nejistota systému měření	22
7	Systém měření výkonových parametrů při impulzním budícím signálu	24
7.1	Konstrukce pro měření při impulzním budícím signálu	24
7.2	Program pro sběr dat ze systému	26
8	Program pro výpočet výkonových parametrů z naměřených dat	27

8.1	Program pro zpracování dat ze systému měření při zatěžování harmonickým signálem síly.....	27
8.1.1	Kontrola generovaného signálu síly	27
8.1.2	Výpočet výkonu	28
8.1.3	Sestavení výkonové matice a její zobrazení	29
8.1.4	Výpočet výkonových parametrů	29
8.1.5	Určení stability maximálního výkonu	30
8.2	Program pro zpracování dat ze systému měření při zatěžování impulzním signálem síly	31
9	Zpracování naměřených dat.....	33
9.1	Piezoelektrický prvek DT1-028K/L	33
9.2	Piezoelektrický prvek DT1-052K	36
9.3	Piezoelektrický prvek DT2-028K	38
9.4	Piezoelektrický prvek LDT1-028K.....	41
9.5	Piezoelektrický prvek LDT2-028K.....	41
9.6	Srovnání měřených piezoelektrických prvků.....	43
	Závěr.....	45
	Literatura	46
	Seznam příloh.....	48
A.	Tabulky určených výkonových parametrů z měření.....	49
B.	Naměřené průběhy	52
C.	CD.....	72

Seznam obrázků

Obrázek 1 Heckmannův diagram [4].....	2
Obrázek 2 Piezoelektrický krystal před deformací (vlevo) a při deformaci (vpravo)	3
Obrázek 3 PVDF piezoelektrický prvek DT1-028KL	6
Obrázek 4 PVDF piezoelektrický prvek DT1-052K.....	6
Obrázek 5 Souřadný systém	8
Obrázek 6 Piezoelektrický materiál diskového tvaru v úchopu d33-metru	15
Obrázek 7 Impedance a fáze křemíkového substrátu s korozivzdornou hmotou [11].....	16
Obrázek 8 Schéma zapojení systému měření při harmonickém budícím signálu ...	17
Obrázek 9 Konstrukce připojená k vibračnímu stolku.....	19
Obrázek 10 Schéma zapojení systému měření při impulzním budícím signálu	25
Obrázek 11 Ukázka průběhu síly při měření.....	26
Obrázek 12 Rezonanční frekvence a její okolí pro určení stability maximálního výkonu	30
Obrázek 13 Okolí 1. detekované f_r prvku DT1-028K/L při harmonickém zatížení	34
Obrázek 14 Okolí 2. detekované f_r prvku DT1-028K/L při harmonickém zatížení	34
Obrázek 15 Názorný průběh generovaného napětí prvkem DT1-028KL, impuls síly 305 N	36
Obrázek 16 Okolí detekované f_r prvku DT1-052K při harmonickém zatížení.....	37
Obrázek 17 Názorný průběh generovaného napětí prvkem DT1-052K, impuls síly 281 N	38
Obrázek 18 Okolí detekované f_r prvku DT2-028K při harmonickém zatížení.....	39
Obrázek 19 Názorný průběh generovaného napětí prvkem DT2-028K, impuls síly 279 N.....	40
Obrázek 20 Výkon měřeného piezoelektrického prvku LDT1-028K v závislosti na odporu	41
Obrázek 21 Okolí detekované f_r prvku LDT2-028K při harmonickém zatížení	42
Obrázek 22 Názorný průběh generovaného napětí prvkem LDT2-028K, impuls síly 340 N.....	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 Seznam přístrojů použitých v systému měření při harmonickém budícím signálu.....	18
Tabulka 2 Seznam přístrojů použitých v systému měření při impulzním budícím signálu.....	25
Tabulka 3 Výkonové parametry prvku DT1-028K/L z harmonického měření.....	34
Tabulka 4 Přenesená energie prvku DT1-028KL na jeden impulz při $R = 249 \text{ k}\Omega$, délka měření 23 ms.....	35
Tabulka 5 Výkonové parametry prvku DT1-052K z harmonického měření	36
Tabulka 6 Přenesená energie prvku DT1-052K na jeden impulz při $R = 249 \text{ k}\Omega$, délka měření 12 ms	38
Tabulka 7 Výkonové parametry prvku DT2-028K z harmonického měření	39
Tabulka 8 Přenesená energie prvku DT2-028K na jeden impulz při $R = 143 \text{ k}\Omega$, délka měření 20 ms	40
Tabulka 9 Výkonové parametry prvku LDT2-028K z harmonického měření.....	42
Tabulka 10 Přenesená energie prvku LDT2-028K na jeden impulz při $R = 143 \text{ k}\Omega$, délka měření 20 ms	43

1 ÚVOD

Během vývoje v posledních letech se výkonové 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 senzorických obvodů. [1]

Bohužel přehled výkonových parametrů pro vyhodnocení vhodnosti použití jednotlivých piezoelektrických přípravků jako zdrojů energie v rámci energy harvesting není mnohdy výrobci uváděn nebo zveřejněn.

Cílem této práce je teoreticky rozebrat možnosti měření popsanych parametrů piezoelektrických energy harvesterů při silovém působení, které by celkově umožňovaly jejich důkladnou parametrizaci.

Parametrizování bude provedeno na základě dvou typů měření, a to při buzení piezoelektrických energy harvesterů harmonickým signálem síly a při buzení impulzním signálem síly.

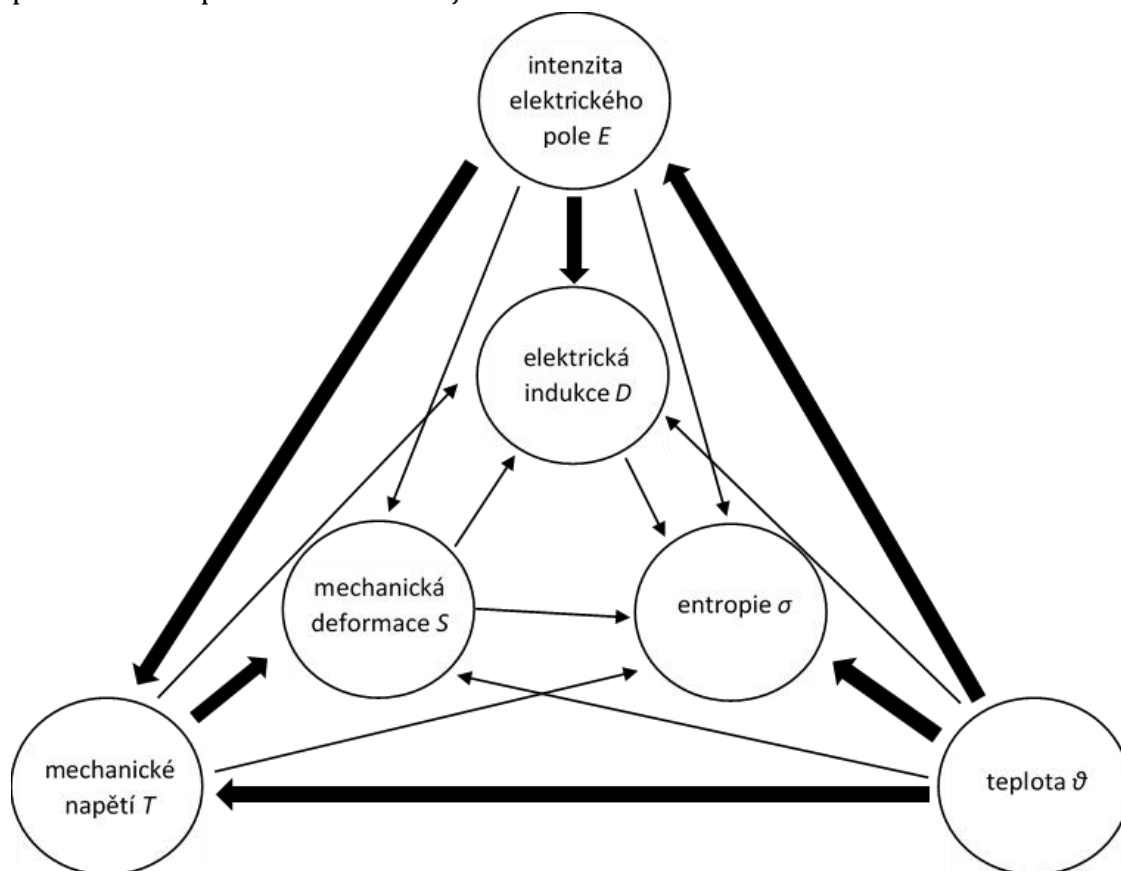
Výsledkem bude popsání měřených piezoelektrických prvků pro jejich použití jako zdroje energie v obvodech, kdy konkrétně bude zkoumáno chování generovaného výkonu v závislosti na odporové zátěži obvodu a velikosti budící frekvence při harmonickém buzení a velikost přenesené energie při jednorázovém zatížení silovým impulzem.

2 PIEZOELEKTRICKÝ JEV

Piezoelektrický jev byl poprvé pozorován v roce 1880 bratry Curiovými, kteří pozorovali vznik povrchového elektrického náboje na krystalu turmalínu po jeho stlačení, a o rok později byl objeven jev opačný Gabrielem Jonas Lippmannem. [2] Tento jev můžeme popsat jako vazbu mezi elastickými a dielektrickými vlastnostmi tělesa, které má lineární závislost mechanického zatížení generujícího náboj v závislosti na velikosti a směru zatížení nebo lineární závislost elektrickým polem vyvolané mechanické deformace na intenzitě a směru elektrického pole.

Generace náboje piezoelektrickým materiálem při působení mechanického zatížení na materiál se nazývá přímý piezoelektrický jev a vznik mechanické deformace piezoelektrického materiálu při působení vnějšího elektrického pole na materiál se nazývá nepřímý piezoelektrický jev. [3]

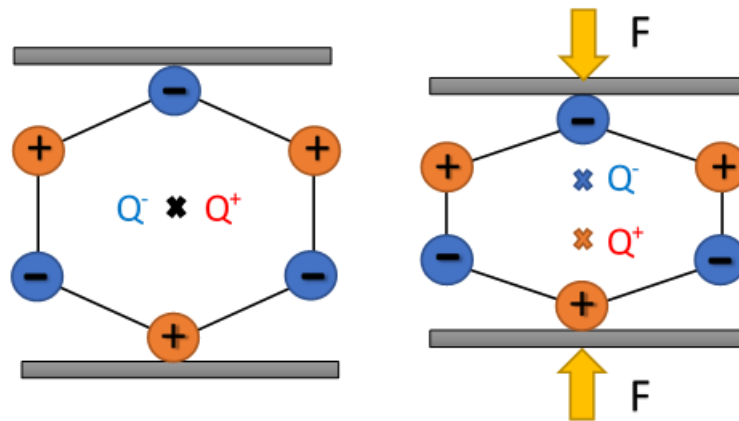
Konkrétní návaznosti mezi intenzitou elektrického pole, elektrickou indukcí, mechanickým napětím a mechanickou deformací znázorňuje Heckmannův diagram (Obrázek 1). Heckmannův diagram dále obsahuje závislosti mezi již zmíněnými veličinami a teplotou a entropií, tyto informace ale již nejsou podstatné při zkoumání piezoelektrického jevu.



Obrázek 1 Heckmannův diagram [4]

2.1 Princip piezoelektrického jevu

V piezoelektrickém krystalu, který není deformován vnější silou, jsou náboje ve formě iontů rozmístěny symetricky, celkový náboj na povrchu krystalu je tedy nulový. Při deformaci piezoelektrických materiálů dochází k posunutí iontů, čímž je symetrie porušena a dochází k posunutí elektrického těžiště záporných a kladných iontů od sebe (Obrázek 2). [5] Díky tomu se objeví elektrický náboj na plochách krystalu.



Obrázek 2 Piezoelektrický krystal před deformací (vlevo) a při deformaci (vpravo)

Můžeme pozorovat analogii mezi chováním piezoelektrických materiálů v elektrickém zapojení a kondenzátory, jelikož konstantní deformace při vzniku vyvolá jednorázový náboj, jehož velikost je závislá na velikosti deformace, který je odveden (vybití kondenzátoru) a na plochách piezoelektrického krystalu se poté (do další změny z pohledu deformace krystalu) další náboj neobjevuje.

2.2 Využití piezoelektrického jevu

Piezoelektrické materiály mají široké využití jako akční členy, oscilátory, akcelerometry nebo jako snímače síly tam, kde je třeba detekovat prudké změny v deformaci nebo detekovat náhlé velké síly. Jsou nedílnou součástí moderní technologie a můžeme je najít takřka ve všech oborech napříč technikou, ale i v běžných spotřebičích. Jejich vlastnosti se uplatňují při taktování procesorů, ve frekvenčních filtrech a zpoždovacích linkách v telekomunikační technice, v lékařství se využívají v diagnostických přístrojích (ultrazvukové sondy, sonograf, tomograf), v senzorové technice jako zdroje ultrazvuku, senzory deformace, rezonátory a mnoho dalších. [5] Dále se objevují v každodenním životě například jako součást airbagů či v zapalovačích.

2.3 Piezoelektrické materiály

V první polovině minulého století bylo pozorováno několik přírodních krystalů, u kterých se projevoval piezoelektrický jev, příkladem je Rochelleova sůl nebo křemen. Nevýhodou těchto přírodních krystalů je, že pro použití piezoelektrického jevu musí být koeficient elektromechanické vazby, který spojuje mechanické a elektrické chování materiálu (viz kapitola 4.5), dostatečně velký. [6]

Ve srovnání s přírodními krystaly piezoelektrická keramika, která byla vyvinuta ve druhé polovině minulého století, vykazuje mnohem větší koeficient elektromechanické vazby. [6] Pro její výrobu se momentálně nejčastěji využívá materiálů na bázi tuhých roztoků oxidů olova, titanu a zirkonu s přídavkem dalších chemických prvků, například stroncia, barya nebo bismutu. Většina takto vyrobené piezoelektrické keramiky má již při výrobě známý způsob využití z důvodu různých vlastností jednotlivých slitin a různých požadavků na jejich vlastnosti v závislosti na použití. [2]

3 ENERGY HARVESTERY

Energy harvesting je proces přeměny různých forem okolní energie na energii elektrickou, která může být poté použita k napájení elektronických zařízení. Vývoj posledních let v této oblasti vedl k celé řadě různých mechanismů, které lze použít ke generaci elektrické energie z mnoha zdrojů, například z tepelné, sluneční, deformační či setrvačné energie. Cílem je konstrukce takového systému, který by mohl zajišťovat přímý zdroj energie pro elektronická zařízení, či sloužit k dobití baterií a kondenzátorů. [7]

Energy harvesting je perspektivní, což odpovídá jemu věnovanému zájmu z průmyslových a akademických kruhů, jelikož umožňuje realizaci autonomních a samostatně napájených nízkoenergetických zařízení, jako jsou například senzorové sítě nebo spotřební elektronika. [8]

Vlastnost energy harvesterů dodávat udržitelný výkon do bezdrátového systému je atraktivní z důvodu absence údržby baterií, což snižuje ekonomické náklady na provoz systému. Další výhodou je absence složitých kabelových systémů, což je relevantní zejména pro instalaci senzorových sítí v nehostinných nebo obtížně dosažitelných prostředích. [8]

3.1 Typy energy harvesterů

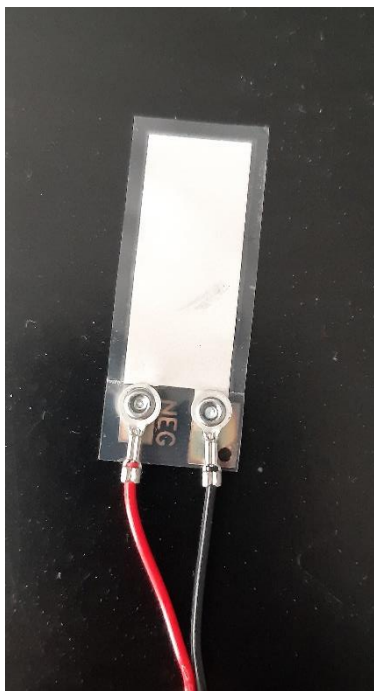
Pokud se zaměříme na energy harvesting vibrační energie, existují tři základní mechanismy pro přeměnu energie vibrací na elektrickou energii. Jsou to energy harvestery na elektromagnetickém, elektrostatickém a piezoelektrickém principu. [6]

Napěťové výstupy energy harvesterů založených na elektromagnetickém principu jsou většinou velmi nízké, a navíc je často zapotřebí několikastupňové zpracování vytvořeného napětí, aby bylo dosaženo dostatečné úrovně napětí umožňující nabití úložiště elektrické energie. To je v přímém rozdílu s piezoelektrickými energy harvestery, které samy o sobě generují dostatečné napěťové výstupy. Další výhodou piezoelektrického oproti elektromagnetickému principu je ta, že piezoelektrická zařízení mohou být vytvořena v makro i mikro měřítku pomocí již zavedené technologie tlustých a tenkých vrstev. Navíc špatné vlastnosti rovinných magnetů a omezeného počtu závitů planárních cívek jsou omezením pro výrobu malých energy harvesterů na elektromagnetickém principu. [6]

Energy harvestery na elektrostatickém principu potřebují ke generaci napětí vnější napěťový nebo nábojový vstup. V tomto ohledu se opět ukazuje výhoda piezoelektrického principu, kdy není třeba žádného vnějšího zdroje elektrické energie, jelikož ta vychází přímo z chování materiálu. [6]

3.2 Piezoelektrické energy harvestery

Většina piezoelektrických energy harvesterů má formu konzolových nosníků s jednou nebo dvěma vrstvami z piezoelektrického materiálu. [6] Při vibraci, kdy dochází ke kompresi (v případě tuhých substrátů) nebo ohybu (v případě pružných substrátů), jsou tyto piezoelektrické prvky namáhány a je generován náboj (viz kapitola 2.1). [1] Hlavní výhodou piezoelektrických energy harvesterů oproti jiným druhům je jejich velká hustota plošného výkonu (maximální generované výkony až desítky mW/cm³) a jednoduchost použití. [6]



Obrázek 3 PVDF piezoelektrický prvek
DT1-028KL



Obrázek 4 PVDF piezoelektrický prvek
DT1-052K

Jelikož obecně jsou piezoelektrické energy harvestery založeny na rovinném substrátu, má smysl výpočet právě plošné hustoty výkonu P_A , která udává podíl mezi výkonem energy harvesteru a aktivní oblastí. [1]

$$P_A = \frac{P}{A} \quad (1)$$

P_A je plošná hustota výkonu, P je výkon energy harvesteru, A je aktivní plocha energy harvesteru.

Kromě plošné hustoty výkonu bývá u piezoelektrických energy harvesterů založených na keramických piezoelektrických materiálech často uváděna i objemová hustota výkonu P_V , která udává podíl mezi výkonem a objemem energy harvesteru a podává u těchto zařízení správnější informace než plošná hustota

výkonu, zejména pokud je potřeba porovnávat výstupy nanostrukturovaných zařízení. [1]

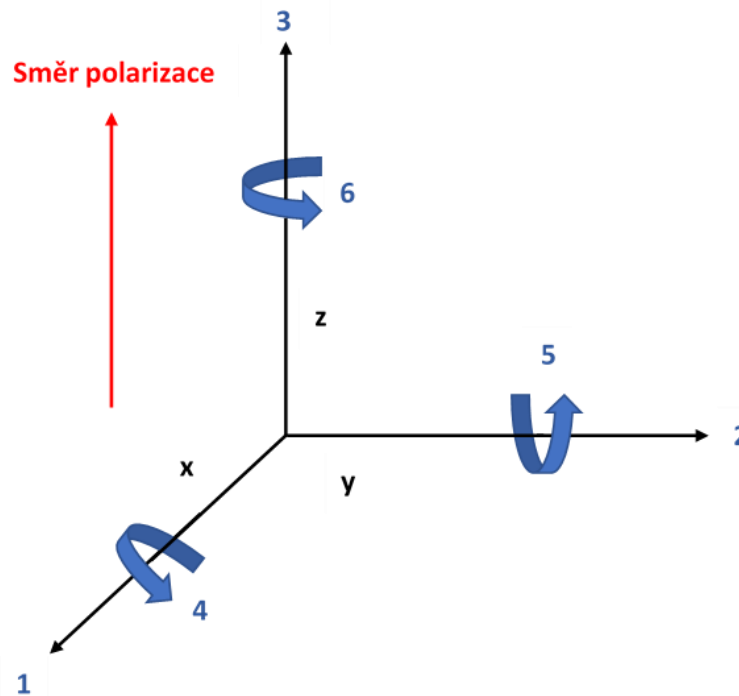
$$P_V = \frac{P}{V} \quad (2)$$

P_V je objemová hustota výkonu, P je výkon energy harvesteru, V je objem energy harvesteru.

Existuje ale více možností výpočtu objemu keramického piezoelektrického energy harvesteru, což může vést k velkým nesrovnalostem. [1]

4 PARAMETRY PIEZOELEKTRICKÝCH ENERGY HARVESTERŮ

Jelikož jsou piezoelektrické materiály anizotropní (jejich vlastnosti jsou závislé na směru měření nebo používání), jsou konstanty, které popisují jejich vlastnosti a jsou ovlivněné tímto jevem, zapisovány ve tvaru β_{ab} , kdy β je příslušná konstanta, index a určuje směr buzení a index b určuje směr odezvy. [9,10] Číselná označení příslušných směrů jsou znázorněna na obrázku 5.



Obrázek 5 Souřadný systém

4.1 Piezoelektrická nábojová konstanta

Piezoelektrická nábojová konstanta d_{ab} popisuje závislost mezi nábojem vygenerovaným piezoelektrickým materiálem a mechanickým napětím působícím na piezoelektrický materiál nebo závislost mezi vzniklou mechanickou deformací a působením vnějšího elektrického pole. Konstanta může být vyjádřena v závislosti na popisujícím vztahu v $[m \cdot V^{-1}]$ nebo v $[C \cdot N^{-1}]$. [9]

Mechanická deformace piezoelektrického materiálu je dána součinem působícího elektrického pole a hodnoty piezoelektrické nábojové konstanty, a proto je tato konstanta důležitým parametrem pro posuzování vhodnosti materiálu pro aplikace závislé na zatížení. [10]

$$d = \frac{D}{T} = \frac{S}{E} [C \cdot N^{-1}], [m \cdot V^{-1}] \quad (3)$$

Parametr d je piezoelektrická nábojová konstanta, T je mechanické napětí, D je elektrická indukce, E je intenzita elektrického pole a S je mechanická deformace.

Další možný vzorec na výpočet piezoelektrické nábojové konstanty je:

$$d = k\sqrt{\varepsilon^T s^E} \quad [C \cdot N^{-1}], [m \cdot V^{-1}] \quad (4)$$

Parametr d je piezoelektrická nábojová konstanta, k je koeficient elektromechanické vazby, ε^T je permitivita materiálu při konstantním mechanickém napětí, s^E je elastický koeficient při působení konstantního elektrického pole, T je mechanické napětí a E je intenzita elektrického pole.

4.2 Piezoelektrická napěťová konstanta

Piezoelektrická napěťová konstanta g_{ab} popisuje závislost mezi vytvořenou mechanickou deformací piezoelektrického materiálu a působením vnější elektrické indukce, nebo jev opačný, a to závislost mezi vytvořeným elektrickým polem a působícím mechanickým napětím, a je vyjádřena v $[Vm \cdot N^{-1}]$. [9]

Jelikož intenzita indukovaného elektrického pole, které je vytvářeno piezoelektrickým materiálem při působení mechanického napětí, je násobkem hodnoty působícího napětí a hodnoty piezoelektrické napěťové konstanty, je tato konstanta důležitá pro posouzení vhodnosti materiálu pro snímací aplikace. [10]

$$g = \frac{E}{T} = \frac{T}{D} \quad [Vm \cdot N^{-1}] \quad (5)$$

Parametr g je piezoelektrická napěťová konstanta, T je mechanické napětí, D je elektrická indukce a E je intenzita elektrického pole.

$$g = \frac{d}{\varepsilon^T} \quad [Vm \cdot N^{-1}] \quad (6)$$

Parametr g je piezoelektrická napěťová konstanta, d je piezoelektrická nábojová konstanta, ε^T je permitivita materiálu při konstantním mechanickém napětí a T je mechanické napětí.

4.3 Permitivita

Permitivita neboli dielektrická konstanta ε_{ab} popisuje závislost mezi elektrickou indukci a působením vnějšího elektrického pole. ε^T vyjadřuje permitivitu při konstantním mechanickém napětí a ε^S vyjadřuje permitivitu při konstantní mechanické deformaci. [10]

K popisu vlastností piezoelektrických materiálů může být použita konstanta K popisující poměr mezi množstvím náboje, který je materiál schopen uložit, a absolutní dielektrickou konstantou ε_0 (náboj, který lze uložit při stejném napětí totožnými elektrodami oddělenými vakuem). [10]

$$K = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad [-] \quad (7)$$

Parametr K je konstanta, ε je permitivita piezoelektrického materiálu, ε_0 je permitivita vakua.

4.4 Elastický koeficient

Elastický koeficient s_{ab} popisuje závislost mezi vzniklým mechanickým napětím a mechanickou deformací piezoelektrického materiálu. Elastické koeficienty ve směru 11 a 33 jsou převrácenou hodnotou Youngova modulu. Důležité elastické koeficienty jsou s^E a s^D , přičemž s^E je elastický koeficient při konstantním elektrickém poli a s^D je elastický koeficient při konstantní elektrické indukci. [10]

$$s = \frac{1}{E} \quad [m^2 \cdot N^{-1}] \text{ pro } s_{11} \text{ a } s_{33} \quad (8)$$

Parametr s je elastický koeficient a E je intenzita elektrického pole.

4.5 Koeficient elektromechanické vazby

Koeficient elektromechanické vazby k_{ab} popisuje účinnost přeměny mechanické energie na elektrickou a naopak. [9, 10]

$$k = \sqrt{\frac{W_E}{W_M}} \quad [-] \quad (9)$$

Parametr k je koeficient elektromechanické vazby, W_E je elektrická práce a W_M je mechanická práce.

Tento vztah je ale ideální a mnohdy není možné určit velikost mechanické práce.

Koeficient elektromechanické vazby k_{31} je možné získat z hodnot rezonanční a antirezonanční frekvence pomocí vzorce:

$$k_{31}^2 = 1 - \left(\frac{f_r}{f_a}\right)^2 \quad (10)$$

Parametr k_{31} je koeficient elektromechanické vazby ve směru 31, f_r je rezonanční frekvence a f_a je antirezonanční frekvence.

Nutno podotknout, že koeficient k_{31} je větší než koeficient k , jelikož koeficient elektromechanické vazby závisí na geometrii piezoelektrického prvku, jeho konstrukci a dalších elastických konstantách spíše než na materiálových konstantách piezoelektrické vrstvy. [11]

Vysoká hodnota koeficientu elektromechanické vazby je žádoucí pro účinnou přeměnu energie, ovšem hodnoty uvedené od výrobců keramiky jsou pouze teoretické maximální hodnoty, jelikož tento parametr nezohledňuje například dielektrické nebo mechanické ztráty. [10]

4.6 Youngův modul

Youngův modul Y_{ab} popisuje mechanickou tuhost látky a je definován jako poměr mezi mechanickým napětím působícím na materiál (síla na jednotku plochy) a vytvořenou mechanickou deformací ve stejném směru (změna délky na jednotku délky). [9, 10]

$$Y = \frac{T}{S} [N \cdot m^{-2}] \quad (11)$$

Parametr Y je Youngův modul, T je mechanické napětí a S je mechanická deformace.

Jelikož u piezoelektrických materiálů mechanické namáhání vytváří nejen mechanické, ale i elektrické odezvy, efektivní Youngův modul měřeným v zapojení nakrátko není totožný s efektivním Youngovým modulem měřeným v zapojení naprázdno. Proto při vyjádření Youngova modulu musí být konkrétně specifikovány nejen směrové, ale i elektrické podmínky. [10]

4.7 Činitel jakosti

Činitel jakosti Q_m vyjadřuje poměr reaktance k odporu v náhradním sériovém obvodu představujícím chování piezoelektrického materiálu a vyjadřuje nevyhnutelné ztráty v obvodu. [9, 12]

$$Q_m = \frac{f_r}{f_2 - f_1} [-] \quad (12)$$

Parametr Q_m je činitel jakosti, f_r je rezonanční frekvence, f_1 a f_2 jsou frekvence, při nichž velikost měřené veličiny (napětí) dosahuje 70,7% amplitudy (výkon při těchto frekvencích je poloviční hodnota maximálního výkonu, jedná se o pokles o 3 dB). [11]

4.8 Rezonanční a antirezonanční frekvence

Rezonanční frekvence f_r a antirezonanční frekvence f_a vycházejí z měření průběhu impedance piezoelektrické součástky v závislosti na frekvenci budícího signálu, na které závisí účinnost přeměny mechanické energie na elektrickou a naopak (koeficient elektromechanické vazby).

Při rezonanční frekvenci, která přibližně odpovídá rezonanční frekvenci náhradního sériového obvodu, dosahuje prvek minimální hodnoty impedance. Naopak při antirezonanční frekvenci, která přibližně odpovídá rezonanční frekvenci náhradního paralelního obvodu, dosahuje prvek maximální hodnoty impedance. [10]

4.9 Ztrátový činitel

Ztrátový činitel δ určuje velikost dielektrických ztrát materiálu a jeho tangens je definován jako poměr odporu a reaktance v paralelním náhradním obvodu. [9] Hodnota tangentu ztrátového činitele je nejčastěji stanovena při frekvenci 1 kHz budícího signálu. [10]

Dále je definován jako poměr reálného výkonu k jalovému výkonu při sinusovém průběhu napětí při dané budící frekvenci. [3]

Tangens ztrátového činitele je zároveň převrácenou hodnotou činitele jakosti.

$$Q_m = \frac{1}{\tan \delta} [-] \quad (13)$$

Parametr Q_m je činitel jakosti a $\tan \delta$ je tangens ztrátového činitele.

5 METODY MĚŘENÍ PARAMETRŮ PIEZOELEKTRICKÝCH ENERGY HARVESTERŮ

Pro důslednou specifikaci výkonových parametrů energy harvesterů je nutná kombinace více měřících metod, jelikož každá je vhodná pouze pro některé parametry. V této kapitole je rozebráno několik možných způsobů měření výkonových parametrů, jaké parametry jsou možné získat z daného typu měření, jejich principy a chyby ovlivňující výsledky měření.

5.1 Měření při zatěžování 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 zdroj tohoto obvodu.

Toto 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. [1]

K výkonovému maximu z pohledu zátěže dochází, když je impedance zátěže rovna impedanci zdroje, tedy impedanci energy harvesteru, a proto je při tomto měření využita vnější zátěž. [11]

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 závislosti na zátěži v obvodu a frekvenci budícího signálu síly spíše než z napětí naprázdno a proudu nakrátko, čímž je také dosaženo lepší porovnání nejen jednotlivých piezoelektrických energy harvesterů z výkonového hlediska, ale i jejich porovnání s jinými typy energy harvesterů. [1]

Měřením výkonů piezoelektrických energy harvesterů v závislosti na odporu a frekvenci je možno zjistit nejen optimální odporové zatížení (odpor, při kterém je dosaženo maximálního výkonu) a rezonanční frekvence (frekvence, při které je dosaženo maximálního výkonu), jak je popsáno v této kapitole, ale i určení elektrických parametrů jako činitel jakosti.

Dále je možno určit impedanci piezoelektrického energy harvesteru při měření nejen napětí, ale i proudu, což ovšem naráží na problematiku přesného měření velmi malých proudů (jejich maximální hodnoty se pohybují řádově v jednotkách

μA), a proto možnost určení impedance piezoelektrického prvku není zahrnuta do této práce. Pro určení impedance piezoelektrického energy harvesteru je mnohem vhodnější metoda měření pomocí impedančního analyzátoru (kapitola 5.4). Impedance piezoelektrického prvku je sice frekvenčně závislá, ovšem její změny se pohybují v takových hodnotách, že ji můžeme považovat za v praktickém použití neměnnou. [1,6]

5.2 Měření při zatěžování energy harvesterů impulzním signálem síly

Měření při zatěžování energy harvesterů impulzním signálem síly je velmi podobné jako měření při zatěžování energy harvesterů harmonickým signálem síly pouze s tím rozdílem, že při impulzním typu je indukován konečný náboj jako pulz. Pro ideální piezoelektrický materiál velikost vytvořeného náboje při dané mechanické deformaci nezávisí na frekvenci budícího signálu, a tudíž může být spočítána velikost energie na pulz (dodaný výkon už ovšem na frekvenci budícího signálu závisí).¹ [1]

Stejně jako u měření při zatěžování energy harvesterů harmonickým signálem, není vhodné určovat vytvořenou energii na špičkovém napětí v zapojení naprázdno, ale v zapojení s odporem. [1]

Při výpočtu okamžitého výkonu generovaného zařízením pomocí rovnice:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (14)$$

P je výkon, R je odporové zatížení a U je maximální napětí na odporu, je zcela zanedbán tvar generovaného napětí při zatěžovacím pulzu.

Mnohem vhodnější je ale měření výkonu v rámci času, jelikož rychlý impulz buzení může generovat libovolně velký proud či napětí a je tedy dosaženo vysokých hodnot okamžitého výkonu, což ovšem neznamená, že takový výkon může být udržován po delší dobu.

Pro přesnější měření dodané energie je tedy měření průměrné energie dodané do zátěže během určité doby pomocí vzorce:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} \frac{U^2}{R} dt \quad (15)$$

E je předaná energie, R je odporové zatížení, U je napětí na odporu, t_1 je začátek časového úseku (začátek silového impulzu) a t_2 je konec časového úseku (ideálně

¹ Přenos náboje je ovlivněn svodovými proudy, a tedy měřená energie na pulz je závislá na četnosti pulzů. Tato závislost je ale u mnohým piezoelektrických materiálů zanedbatelná.

ustálení generovaného napětí). Celkový časový úsek by měl být co nejkratší pro minimalizaci vlivu šumu během měření, ovšem zároveň dostatečně dlouhý pro zahrnutí všech zákmitů napětí.

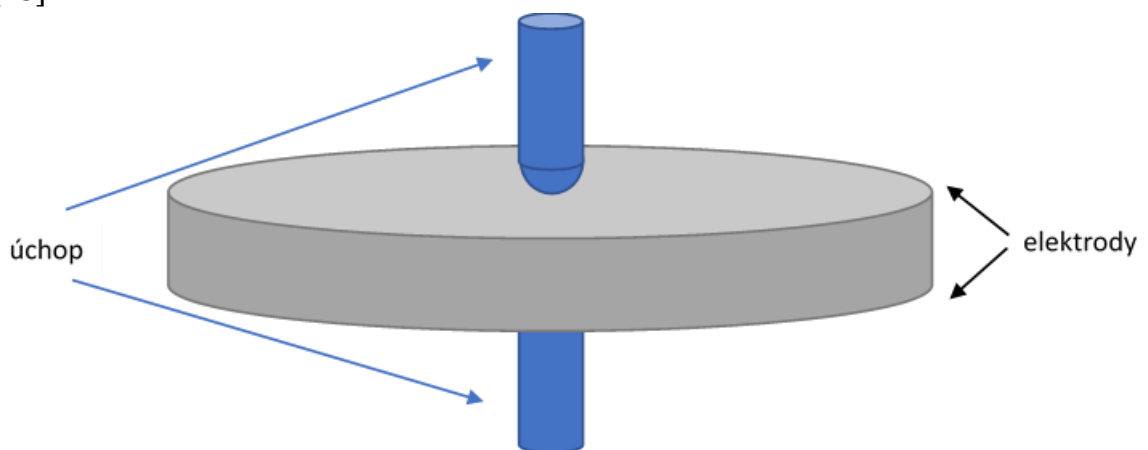
Díky sledování průběhu generovaného výkonu v čase můžeme sledovat setrvačnost piezoelektrického energy harvesteru, tedy dobu generace náboje po vzniku silového impulzu.

Z měření při zatěžování energy harvesterů impulzním signálem je možné určit optimální odporové zatížení (odpor při největším výkonu na pulz) a průměrnou předanou energii na pulz (viz vzorec 15 při zatížení jedním pulzem).

Stejně jako u měření při zatěžování energy harvesterů harmonickým signálem bylo možné určení více parametrů energy harvesterů při měření proudu v zapojení, což ovšem naráží na stejnou problematiku jako při měření při zatížení harmonických signálem síly (viz kapitola 5.1).

5.3 Měření pomocí d_{33} -metru

D_{33} -metr je specializovaný přístroj určený k měření piezoelektrických konstant. Upnutý piezoelektrický prvek je zatěžován signálem síly o frekvenci okolo 110 Hz a přístroj zpracovává elektrický signál generovaný na elektrodách měřeného prvku. Po porovnání naměřených dat s vbudovanými referencemi je určena piezoelektrická nábojová konstanta ve směru 33. Tyto přístroje také umožňují měření kapacity materiálu, jeho dielektrické ztráty, případně s použitím adaptéru je možné měření i piezoelektrické nábojové konstanty ve směru 31 a směru 15. [13]



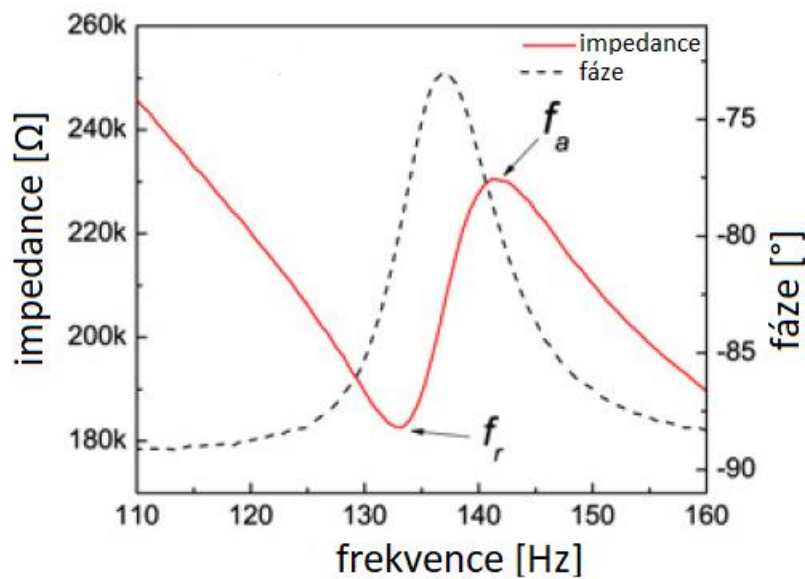
Obrázek 6 Piezoelektrický materiál diskového tvaru v úchopu d_{33} -metru

Výsledek měření může být zásadním způsobem ovlivněn špatným umístěním měřeného materiálu do úchopu přístroje, ovšem závažnost této problematiky je ovlivněna zejména geometrií a velikostí piezoelektrického prvku. Velké odchylky mohou nastat u měřených prvků válcovitého typu. Pokud je měřený prvek

diskového tvaru a je zachycen v d_{33} -metru uprostřed, nevstupuje do měření problematika nehomogenity zatížení a případný posun prvku v přístroji. [14]

5.4 Měření pomocí impedančního analyzátoru

Měření pomocí impedančního analyzátoru slouží k určení některých výkonových parametrů piezoelektrických energy harvesterů z elektrického hlediska. Z měření impedance a fáze přípravku je možné určit rezonanční a antirezonanční frekvenci (viz kapitola 4.8). [11]

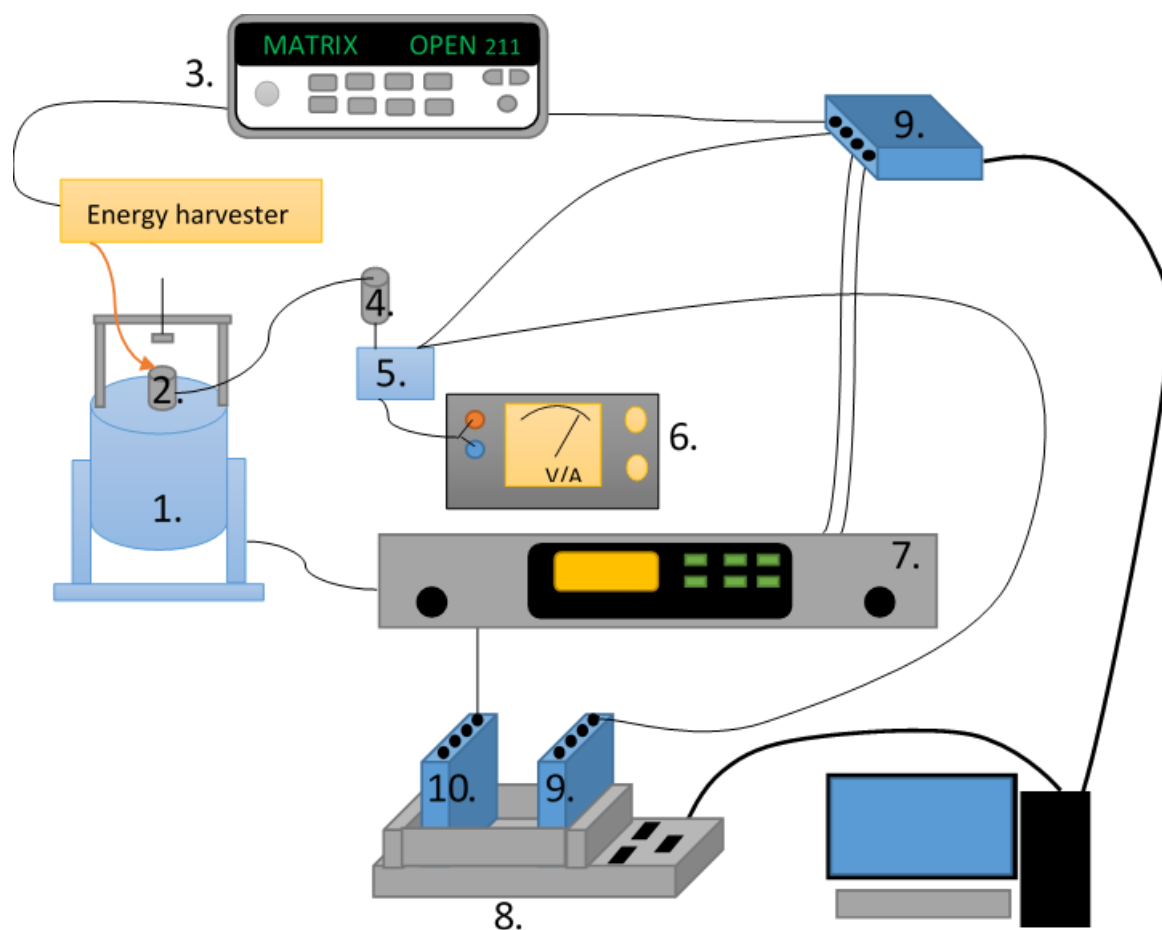


Obrázek 7 Impedance a fáze křemíkového substrátu s korozivzdornou hmotou [11]

Dále ze získaných hodnot rezonanční a antirezonanční frekvence je možné získat další parametry, zejména koeficient elektromechanické vazby (viz kapitola 4.5)

6 SYSTÉM MĚŘENÍ VÝKONOVÝCH PARAMETRŮ PŘI HARMONICKÉM BUDÍCÍM SIGNÁLU

V této kapitole je rozebrán způsob provedení systému pro měření výkonových parametrů piezoelektrických energy harvesterů při harmonickém budícím signálu (teoretický popis metody viz kapitola 5.1), přičemž vytvořený systém umožňuje automatizované měření díky hardwarovému propojení s programovacím prostředím LabVIEW od americké firmy National Instruments, který umožňuje tvorbu virtuálních přístrojů sloužících pro sběr, analýzu, zobrazení a uložení dat.



Obrázek 8 Schéma zapojení systému měření při harmonickém budícím signálu

Názvy jednotlivých použitých přístrojů a jejich sériová nebo identifikační čísla jsou uvedena v následující tabulce 1.

Tabulka 1 Seznam přístrojů použitých v systému měření při harmonickém budícím signálu

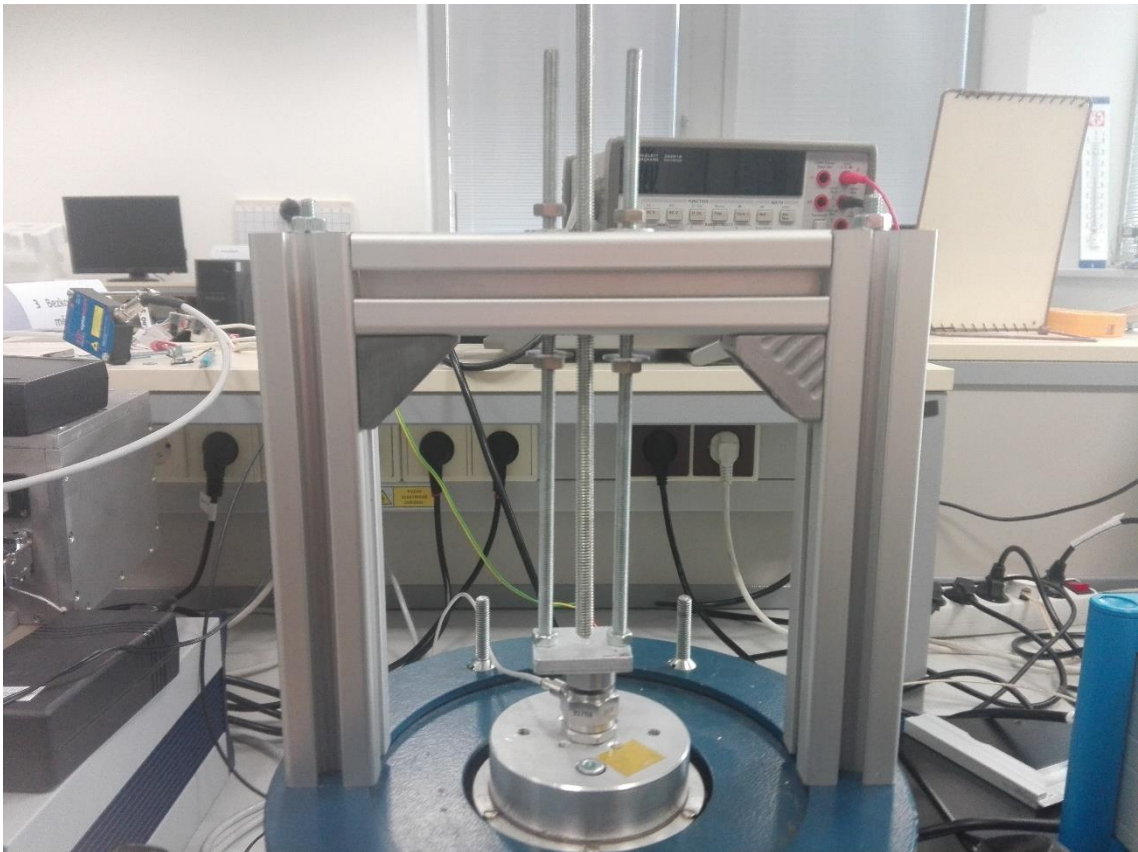
číslo přístroje	přístroj	název	číslo
1	vibrační stolek	ROBOTRON-MESSELEKTRONIK Typ 11077	63400
2	snímač síly	Bruel & Kjaer 8200	957118
3	měřicí ústředna	Agilent 34970A	US37040992
4	nábojový zesilovač	IEPE 100	150007
5	piezotron	M28	081560
6	stabilizovaný zdroj	TESLA BK 127	332514
7	výkonový zesilovač	Bruel & Kjaer 2732	B2732E02A04K0179
8	integrováný kontrolér	NI cRIO-9067	155824C-01L 307AEF6
-	nábojový zesilovač	KISTLER 5015	1683284
9	2x měřicí karta	NI-9234	195551C-01L 1CCA58B, 195551C-01L 1CCA58B
10	měřicí karta	NI-9263	198856B-01L 16FF0B2

6.1 Popis použitých přístrojů a jejich funkcionality v rámci systému měření

V této kapitole jsou rozebrány jednotlivé části systému pro měření výkonových parametrů piezoelektrických energy harvesterů při harmonickém budícím signálu, z jakých přístrojů se skládají a jakou funkci jednotlivé přístroje zastávají.

6.1.1 Vibrační stolek ROBOTRON-MESSELEKTRONIK Typ 11077

Vibrační stolek typu 11077 od firmy ROBOTRON-MESSELEKTRONIK slouží ke generaci harmonické síly, která zatěžuje vložený energy harvester. Vložený energy harvester je přitážen k vibračnímu stolku pomocí konstrukce vyobrazené na obrázku 9. Konstrukce zajišťuje předepnutí síly, čímž je zajištěn neustálý kontakt mezi proměřovaným energy harvesterem a vibrující armaturou vibračního stolku.



Obrázek 9 Konstrukce připojená k vibračnímu stolku

Frekvenční rozsah vibračního stolku typu 11077 od firmy ROBOTRON-MESSELEKTRONIK uvedený výrobcem je 12 Hz až 4 kHz pro vibrační excitaci a při zatížení umožňuje dosažení amplitudy síly až 15 N. Parametry vibračního stolku jsou tedy dostatečné pro plánovaná měření pohybujících se do přibližné frekvence 300 Hz. Experimentálně zjištěná maximální únosná amplituda síly vytvořené konstrukce se pohybuje okolo 5 N_{rms}, měření je tedy prováděno při nižších silách, aby nedocházelo k rozkmitání konstrukce.

6.1.2 Snímač síly Bruel & Kjaer 8200

Snímač síly Bruel & Kjaer 8200 je založený na piezoelektrickém principu, převádí tedy snímanou sílu na náboj s převodním koeficientem 4,05 pC/N, který je poté veden do kanálu pro měření síly (v případě měření výkonových parametrů) nebo nábojového zesilovače KISTLER 5015 (v případě měření silového předpětí, viz kapitola 6.1.5).

Tento snímač je napojen na vibrující armaturu vibračního stolku ROBOTRON-MESSELEKTRONIK Typ 11077 a snímá sílu působící od stolku na konstrukci, která slouží k zatížení energy harvesteru (Obrázek 9).

6.1.3 Měřicí ústředna Agilent 34970A

Měřicí ústředna Agilent 34970A se dvěma zásuvnými moduly ve formě odporových dekád o odporech od 100 Ω do 10 k Ω a od 10 k Ω do 10 M Ω slouží k jejich přepínání, které je řízené měřícím programem v programovém prostředí LabVIEW (viz kapitola 6.2). Do sepnutého odporu je přivedeno napětí generované energy harvesterem, přičemž úbytek napětí na tomto odporu je poté měřen měřící kartou NI-9234.

Měřicí karta 9234 od firmy National Instruments má maximální vzorkovací frekvenci 51,2 kS/s a při měření střídavého napětí je pokles větší než 0,1 dB pro frekvence nižší než 4,6 Hz (tato problematika nezasahuje do provedeného měření z důvodů vyšších měřených frekvencí). Zároveň tato karta umožňuje dostatečně přesné měření (chyba udaná výrobcem je $\pm 0,05$ % ze čtení a $\pm 0,006$ % z rozsahu [15]), aby mohla být v tomto zapojení použita.

Přesnost použitých odporů viz kapitola 6.3.

6.1.4 Kanál pro měření síly

Jelikož výstupem piezoelektrického snímače síly je náboj a nikoliv napětí, je potřeba využití nábojového zesilovače, který integruje generovaný náboj. Při použití nábojového zesilovače se navíc v měření tolik neuplatňují svodové odpory senzoru a kabelu a kapacity kabelu, která je závislá na jeho délce a ohybu. Výstupní napětí kopíruje průběh veličiny generující náboj s převodní konstantou, která odpovídá převrácené hodnotě kapacity v nábojovém zesilovači. [16]

Kanál pro měření síly se tedy skládá z nábojového zesilovače IEPE 100, piezotronu Senzor Supply Module M28 a stabilizovaného zdroje TESLA BK 127 a zajišťuje převod generovaného náboje ze snímače síly Bruel & Kjaer 8200 na napětí.

6.1.5 Nábojový zesilovač KISTLER 5015

Nábojový zesilovač KISTLER 5015 je před začátkem měření zapojen místo kanálu pro měření síly a slouží k nastavení předepnutí síly (viz kapitola 6.1.1), jelikož umožňuje nastavení dostatečně dlouhé časové konstanty (DC Long, 10 000 sekund), díky které je možné sledovat sílu působící konstrukcí na snímač síly Bruel & Kjaer 8200 při postupném zatěžování. Toto sledování je dále usnadněno nastavitelnou citlivostí snímače na nábojovém zesilovači KISTLER 5015, díky kterému je na displeji přímo zobrazována působící síla.

Tento nábojový zesilovač je sice možné použít s vhodným nastavením místo celého kanálu pro měření síly, ovšem tato možnost nebyla využita z důvodu možnosti použití levnějších přístrojů, jejichž přesnost a vlastnosti jsou dostatečné v daném použití.

6.1.6 Hardwarová část ovládající vibrační stůl

Pro regulaci vibračního stolku je využit integrovaný kontrolér NI cRIO-9067 a výkonový zesilovač Bruel & Kjaer 2732, přičemž do integrovaného kontroléru je nahrána softwarová část pro řízení regulace (viz kapitola 6.2) z důvodu nutnosti nepřetržité regulace, kterou není možné zajistit pouze spuštěním programu na regulaci vibračního stolku na počítači. Napěťový výstup z integrovaného kontroléru zajišťuje měřicí karta NI-9263, přičemž tento výstup vstupuje do výkonového zesilovače Bruel & Kjaer 2732, který zajišťuje zesílení signálu a proudové omezení výstupního proudu pro ochranu vibračního stolku před přebuzením.

6.2 Softwarová část ovládání vibračního stolku a sběr dat

Softwarová část na ovládání vibračního stolku a sběr dat je realizována jako dva propojené programy vytvořené v programovacím prostředí LabVIEW.

První program je určený k regulaci vibrací, přičemž požadovaná frekvence a amplituda harmonického signálu jsou získávány z druhé programové části. Regulace je řešena PI regulátorem s nastavitelnými parametry, které je potřeba uživatelsky měnit mimo měření v závislosti na proměřovaných frekvencích a amplitudě, aby nedošlo k rozkmitání výstupní hodnoty regulace. Data, podle kterých probíhá regulace, jsou získávána z kanálu pro měření síly (viz kapitola 6.1.4).

Druhý program uskutečňuje nastavení měření, které má dvě možnosti. První je možnost měření frekvenční charakteristiky, kdy je měřen úbytek napětí pouze na jednom odporovém zatížení při měnící se frekvenci, aby bylo možné odhadnout

přibližnou rezonanční frekvenci a provést měření v jejím frekvenčním okolí. Druhá možnost je už požadované měření úbytku napětí na sadě odporových zatížení (viz kapitola 6.1.3) v závislosti na frekvenci budícího signálu. Měření vždy čeká na informaci z prvního programu indikující ustálení výstupní hodnoty regulace, načež jsou měřena data z kanálu pro měření síly (viz kapitola 6.1.4) s frekvencí 51 200 vzorků za sekundu (maximální vzorkovací frekvence pro měřící kartu NI 9234), která jsou ukládána do vytvořeného TDMS souboru. Takto je proměřen úbytek napětí na celé odporové sadě pro danou frekvenci, načež je tímto programem změněna požadovaná frekvence budícího signálu o nastavitelný frekvenční krok, na který reaguje první program a druhý program opět čeká na ustálení výstupní hodnoty regulace. Tímto způsobem jsou proměřeny všechny frekvence od nastavené počáteční frekvence po nastavenou konečnou frekvenci, po které dojde k ukončení měření, přičemž regulace probíhá i nadále z bezpečnostního důvodu zaručujícího nepoškození vibračního stolku.

6.3 Nejistota systému měření

V rámci nejistot určených výkonových parametrů, tedy činitele jakosti, optimálního odporového zatížení, maximálního výkonu a rezonanční frekvence má smysl pouze určení nejistoty maximálního výkonu a optimálního odporového zatížení. Nejistota rezonanční frekvence je dána chybou proložením naměřených dat a tolerovanou odchylkou od požadované frekvence při generaci harmonického signálu síly. Nejistota činitele jakosti by byla možná určit pomocí nejistot výkonu, ovšem jelikož měření probíhalo na jednom systému, projevují se systematické chyby, které celou charakteristiku posunují neznámým směrem.

Výkon je určován nepřímým měřením přes známý odpor a napětí, rozšířená nejistota je tedy určena pomocí vzorce

$$\begin{aligned}
 U_P &= k_r u_c = \\
 &= k_r \sqrt{u_{bR}^2 \left(\frac{dP}{dR}\right)^2 + u_{bU}^2 \left(\frac{dP}{dU}\right)^2} = k_r \sqrt{u_{bR}^2 \left(\frac{d\frac{U^2}{R}}{dR}\right)^2 + u_{bU}^2 \left(\frac{d\frac{U^2}{R}}{dU}\right)^2} = \quad (16) \\
 &= k_r \sqrt{u_{bR}^2 \left(-\frac{U^2}{R^2}\right)^2 + u_{bU}^2 \left(\frac{2U}{R}\right)^2}
 \end{aligned}$$

,kdy $k_r = 2$ (95% pravděpodobnost, že v daném intervalu se nachází výsledek měření), U je měřené napětí a R je odporové zatížení při daném měření. Nejistota typu B odporu a napětí je určena pomocí vzorce:

$$u_{bX} = \frac{\delta_H X_H + \delta_R X_R}{\chi} \quad (17)$$

,kdy u_{bx} je nejistota typu B dané veličiny, δ_H je chyba z hodnoty udávaná výrobcem, δ_R je chyba z rozsahu udávaná výrobcem, X_H je měřená hodnota dané veličiny, X_R je rozsah přístroje a χ je koeficient vázaný na tvar rozložení chyby, hodnota pro χ je při základní výstupní kontrole výrobce $\sqrt{3}$. Hodnoty chyby ze čtení a z rozsahu karty NI-9234 měřícím napětí jsou určeny výrobcem jako $\delta_H = 0,05 \%$ a $\delta_R = 0,006 \%$. [15] Hodnoty chyby ze čtení a z rozsahu multimetru Agilent 34401A určujícím nejistotu odporu (vysvětleno dále) jsou určeny výrobcem jako $\delta_H = 1 \%$ a $\delta_R = 0,1 \%$ (tyto hodnoty jsou stejné pro rozsahy od 1 k Ω do 1 M Ω). [17]

Nejistota optimálního odporového zatížení je dána chybou vzniklou nedokonalým proložením závislosti výkonu na odporu, změnou odporů v odporové dekádě v čase a nepřesností multimetru Agilent 34401A, kterým byly měřeny odpory v odporových dekádách. Praktickým měřením byla určena opakovatelnost 0,04 %, což je dostatečně nízká hodnota, aby mohly být považovány odpory dané odporovými dekádami za časově neměnné, tudíž určená nejistota je dána zejména přesností multimetru Agilent 34401A. Rozšířená nejistota optimálního odporového zatížení je určena pomocí vzorce:

$$U_R = k_r u_c = k_r \frac{\delta_H R_H + \delta_R R_R}{\chi} \quad (18)$$

,kdy $k_r = 2$ (95% pravděpodobnost, že v daném intervalu se nachází výsledek měření), δ_H je chyba z hodnoty udávaná výrobcem, δ_R je chyba z rozsahu udávaná výrobcem, R_H je měřená hodnota odporu, R_R je rozsah přístroje (odpory na odporové dekádě byly určeny vždy pomocí nejmenšího možného rozsahu přístroje) a χ je koeficient vázaný na tvar rozložení chyby, hodnota pro χ je při základní výstupní kontrole výrobce $\sqrt{3}$. Hodnoty chyby ze čtení a z rozsahu jsou určeny výrobcem jako $\delta_H = 1 \%$ a $\delta_R = 0,1 \%$ (tyto hodnoty jsou stejné pro rozsahy od 1 k Ω do 1 M Ω). [17]

Pro parametry, u kterých není stanovená nejistota měření (tedy rezonanční frekvence a činitel jakosti), má smysl z výsledných měření stanovovat maximální relativní odchylku pro stanovení přesnosti vyčíslení pomocí vzorce:

$$\delta_{max} = \frac{X_{max} - X_{min}}{X_{min}} \cdot 100 [\%] \quad (19)$$

,kdy X_{max} je maximální zjištěná hodnota veličiny, X_{min} je minimální zjištěná hodnota.

7 SYSTÉM MĚŘENÍ VÝKONOVÝCH PARAMETRŮ PŘI IMPULZNÍM BUDÍCÍM SIGNÁLU

V následujících kapitolách je rozebrán mechanický princip a systém sběru dat systému pro měření výkonových parametrů piezoelektrických energy harvesterů při impulzním budícím signálu, jehož teoretický princip je popsán v kapitole 5.2.

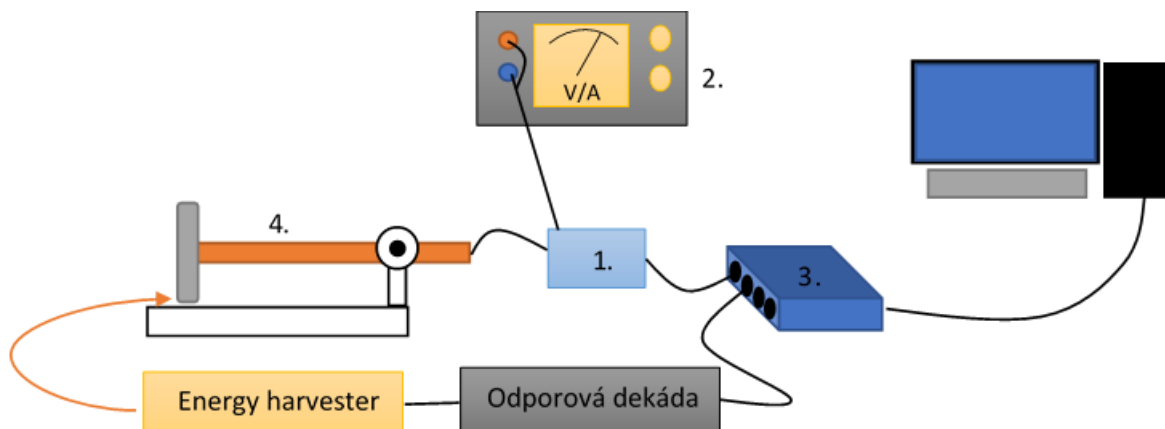
Jak je zmíněno v kapitole 5.2, hlavními informacemi o piezoelektrických energy harvesterech při tomto způsobu měření je optimální odporové zatížení a průměrná přenesená energie na silový pulz.

Jelikož ze systému měření výkonových parametrů piezoelektrických energy harvesterů při harmonickém budícím signálu je již známá optimální odporová zátěž (respektive přibližná hodnota kvůli její frekvenční závislosti viz kapitola 5.1). Vytvořený systém založený na impulzním buzení piezoelektrických energy harvesterů se tedy zabývá průměrnou předanou energií na pulz při optimální odporové zátěži.

7.1 Konstrukce pro měření při impulzním budícím signálu

Jako základ systému měření byla využita konstrukce ke kalibraci rázového kladívka, kterou vytvořil v rámci své diplomové práce Kalibrace rázového kladívka Ing. Šimon Bilík. [18] Tato konstrukce využívá ke generaci rázů kyvadlový pohyb kladiva a následný náraz do kovové plochy. Prvoplánově k detekci rázů bylo zamýšleno použití piezoelektrického snímače síly na rozmezí kovová plocha – kladivo, ovšem z důvodu velké náročnosti na vlastnosti snímače bylo zvoleno jako snímač průběhu silových impulzů rázové kladívko Model 2302 od firmy Endevco s převodní konstantou 1,14 mV/N, které je k tomuto typu měření přímo určeno do sil 4448 N. [19]

Při nárazech rázového kladívka do kovové plochy (náraz kov na kov) docházelo k velkému zkreslení signálu síly z důvodu odrazů impulsního kladívka od plochy. Z tohoto důvodu byla na kovovou podložku přidána překližka, která utlumovala náraz kladívka do plochy.



Obrázek 10 Schéma zapojení systému měření při impulzním budícím signálu

Názvy jednotlivých použitých přístrojů a jejich sériová nebo identifikační čísla jsou uvedena v následující tabulce 2.

Tabulka 2 Seznam přístrojů použitých v systému měření při impulzním budícím signálu

číslo přístroje	přístroj	název	číslo
1	piezotron	M28	081560
2	stabilizovaný zdroj	TESLA BK 127	332512
3	měřící karta	NI-9234	195551C-01L 1CCA58B
4	rázové kladívko	Endevco Modal hammer model 2302	2491

Pro nastavení odporové zátěže byla použita odporová dekáda společně se sadou odporů připojovanými sériově. Nastavené odporové zatížení bylo kontrolováno pomocí multimetru Agilent 34401A.

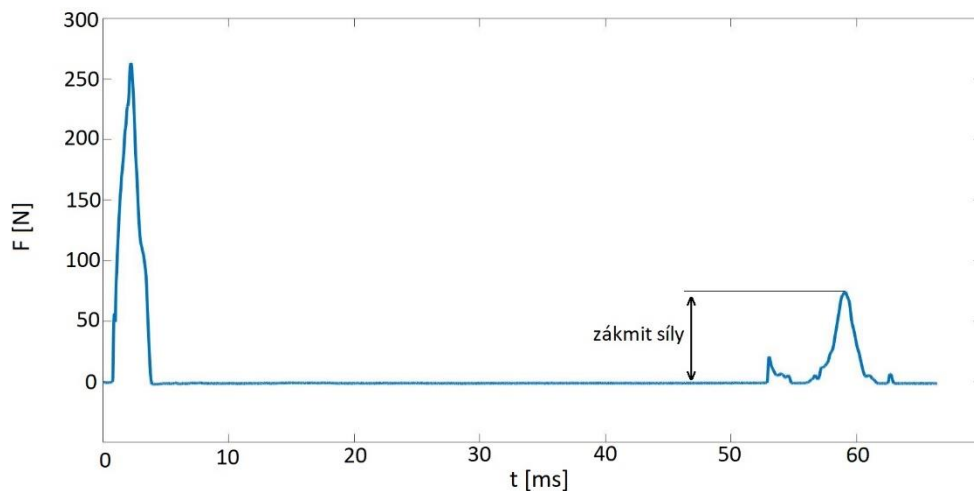
Během měření jsou měřeny dva signály. První je signál z rázového kladívka, kterým se sleduje průběh silového impulzu a je využit jako trigger pro měřící program, druhý je signál z externí odporové zátěže, na kterou je přiveden výstup energy harvesteru.

Jelikož impulzy síly generuje uživatel pomocí nastavení rázového kladívka do určité výšky, do měření vstupuje lidský faktor, který snižuje opakovatelnost generace síly. Aby nedocházelo k velkému rozpětí velikostí generovaných impulzů síly, ke konstrukci byla přidána zarážka, která udávala výšku kladívka pro generaci přibližně odpovídajících impulzů síly. Takto upravená aparatura generuje rázy o velikostech 300 ± 50 N, přičemž trvání rázu je přibližně 4 ms.

7.2 Program pro sběr dat ze systému

Program pro sběr dat vždy načítá data za 1 sekundu, která následně zpracovává. Jelikož měření není plně automatizované a potřebuje zásah operátora k vytvoření silových impulzů, musí být této skutečnosti přizpůsoben program zajišťující sběr a zápis dat. Pouhé použití triggeru není dostatečné z důvodu potřeby dat v čase těsně před a po ukončení silového impulzu. Data před silovým impulzem jsou řešena pomocí pretriggeru, který funguje jako buffer, jehož data jsou zapsána až při spuštění triggeru.

Jelikož při dokmitávání signál síly dosahoval úrovně nad hodnotu triggeru ze signálu síly (Obrázek 11) nebylo třeba řešit situaci, kdy by byla useknuta potřebná data ze signálu napětí při přítomnosti impulzu signálu síly na úplném konci zpracovávaných dat v daném časovém úseku.



Obrázek 11 Ukázka průběhu síly při měření

Data jsou získávána se vzorkovací frekvencí 51,2 kS/s. Počet vzorků za sekundu musí být dostatečně velký kvůli krátkému trvání silového impulzu a rychlému vybití náboje na piezoelektrickém energy harvesteru.

8 PROGRAM PRO VÝPOČET VÝKONOVÝCH PARAMETRŮ Z NAMĚŘENÝCH DAT

Pro přehlednost vytvořeného programu a zjednodušení uživatelského ovládání byl pro zpracování dat vytvořen jeden hlavní projekt v programovacím prostředí LabVIEW, který v sobě obsahuje dva hlavní VI s názvem *main_harmonicky_signal* a *main_impulzni_signal*. Ty zpracovávají naměřená data z odpovídajících systémů měření výkonových parametrů piezoelektrických energy harvesterů.

V následujících kapitolách jsou rozebrány oba tyto programy, kdy jsou popsány jejich teoretické principy.

8.1 Program pro zpracování dat ze systému měření při zatěžování harmonickým signálem síly

V této kapitole je rozebrán program zpracovávající naměřená data ze systému měření popsaného v kapitole 6, který vypočítává výkonové parametry piezoelektrických energy harvesterů, konkrétně maximální výkon, optimální odporové zatížení, rezonanční frekvenci a činitel jakosti. Dále je také zkoumána stabilita maximálního výkonu v okolí rezonanční frekvence.

Pro srozumitelnější popis je vytvořený program pomyslně rozdělen do pěti částí, přičemž tyto části jsou v rámci této práce pojmenovány:

- kontrola generovaného signálu síly,
- výpočet výkonu,
- sestavení výkonové matice a její zobrazení,
- výpočet výkonových parametrů,
- určení stability maximálního výkonu.

8.1.1 Kontrola generovaného signálu síly

Kontrola generovaného signálu síly, který má požadovaný sinusový průběh, je provedena jako výpočet jeho celkového harmonického zkreslení (THD). Celkové harmonické zkreslení je indikátor nekorektního měření, kdy nejčastěji vlivem špatného předepnutí síly v závislosti na požadované amplitudě signálu síly dochází k porušení neustálého fyzického kontaktu mezi proměřovaným přípravkem a konstrukcí zajišťující předepnutí síly. Porušením neustálého kontaktu vznikají silové rázy zatěžující piezoelektrický přípravek, které znehodnocují naměřená data, a tedy i vypočtené hodnoty parametrů.

Programově tato část byla zrealizována pomocí funkčního bloku zajišťujícího výpočet THD, který vypočítává poměr součtu výkonů všech vyšších harmonických

složek k výkonu základní harmonické, přičemž je nastaven tak, aby hledání vyšších harmonických složek bylo zastaveno při dosažení Nyquistova kritéria.

Problematika funkčního bloku *Harmonic Distortion Analyzer VI* v prostředí LabVIEW je, že vždy sám vyhledává základní harmonickou složku, a tudíž v případě velmi zkresleného signálu nemusí vypočítávat korektní hodnoty. Uvedená problematika zasahuje do této práce pouze za předpokladu, že frekvenční složky zapříčiněné silovými rázy dosahují větších amplitud, než má samotná frekvenční složka zapříčiněná harmonickým buzením. Takový případ by pravděpodobně zapříčinil i vizuální změny na měřícím systému (na konstrukci zajišťující předepnutí síly), což je možné považovat za dostatečnou indikaci nekorektního měření.

Celkové harmonické zkreslení je umožněno zobrazit jakožto maximální hodnotu nebo graf zobrazující celkové harmonické zkreslení pro jednotlivá měření.

Programově je umožněno přeskočení tohoto výpočtu, protože významně prodlužuje výpočetní dobu a je důležitý pouze při prvním zpracování dat, kdy je díky němu možné detekovat odlišnost generovaného signálu síly od harmonického.

8.1.2 Výpočet výkonu

Pro výpočet výkonu je využito spektrální měření napětí, jelikož je hledána výkonová složka konkrétní harmonické složky signálu. To vychází z podstaty měření, kdy je energy harvester buzen harmonickým signálem síly. Díky použití spektrálního měření do výpočtu nezasahují výkony ostatních spektrálních složek, které by v případě použití efektivní hodnoty napětí způsobily nepřesnosti. Dále je díky tomu odstraněna harmonická složka při frekvenci 50 Hz, která je způsobena měřícími přístroji napojenými na elektrickou síť.

Pro výpočet rychlé Fourierovy transformace měřeného signálu napětí je dále použito vlastností oken, kdy bylo konkrétně v tomto případě zvoleno okno Flat Top, které je vhodné při výpočtu FFT sinusového signálu, kdy je důležitá přesnost určení amplitudy harmonických složek. [20] Využití oken je potřeba z důvodu ořezu signálu při ukončení měření, kdy měření neobsahuje celý počet period. V tomto případě dochází ke spektrálnímu úniku, tedy vzniku ostrých přechodů – nespojitostí – mezi začátkem a koncem měřeného signálu, které se projeví jako vysokofrekvenční složky signálu. [20]

Při znalosti základní harmonické složky je výkon určen pomocí vzorce 14.

Programová část na výpočet výkonu postupně načítá ze zvoleného TDMS souboru signál napětí generovaného energy harvesterem při jednotlivých měření a z tohoto signálu je pomocí FFT určena velikost základní harmonické složky (frekvence základní harmonické složky je známa z podstaty generace signálu).

8.1.3 Sestavení výkonové matice a její zobrazení

Sestavení výkonové matice je pouze utřídění vypočtených výkonů do matice o velikosti odpovídající počtu měřených frekvencí a použitých odporů, aby určené průběhy výkonu mohly být zobrazeny jako 3D graf.

Programově je v této části řešena úprava polí frekvencí a odporů, jelikož jsou jejich hodnoty vytahovány z parametrů jednotlivých kanálů TDMS souboru a všechny frekvence a odpory se tedy v polích, které jsou vytvořeny pouze zařazením odpovídajících parametrů všech kanálů za sebe, opakují.

Pro zobrazení výkonu v závislosti na frekvenci a odporu je využito propojení mezi programy LabVIEW a MATLAB pomocí struktury MATLAB script. Program MATLAB je využit z důvodu lepší programové práce a zobrazení 3D grafů.

8.1.4 Výpočet výkonových parametrů

Jelikož přesné určení činitele jakosti, optimální odporové zátěže a rezonanční frekvence není možné pouze z naměřených dat, je nutno naměřenému průběhu zjemnit krokování na x-ové ose (frekvence nebo odpor). To je řešeno nejdříve přes nalezení příslušné frekvence (zdánlivá rezonanční frekvence) a odporu (zdánlivé optimální odporové zatížení) pro maximum naměřeného výkonu a poté je z výkonové matice vytáhnuo pole výkonů v závislosti na odporu při zdánlivé rezonanční frekvenci a pole výkonů v závislosti na frekvenci při zdánlivé optimální odporové zátěži. Tyto průběhy (zejména výkon v závislosti na odporu při zdánlivé rezonanční frekvenci) je třeba proložit splinem, který zajišťuje zvětšení počtu bodů v průběhu, přičemž je třeba dostatečný počet měření, aby nedošlo vlivem proložení k závažnější deformaci průběhu výkonu.

Při proložení splinem je stonásobně zvýšen počet y-ových hodnot (výkon) v obou průbězích.

Z upraveného průběhu výkonu v závislosti na frekvenci při zdánlivé optimální odporové zátěži byly určeny přesnější hodnoty činitele jakosti (vzorec 12) a rezonanční frekvence (x-ová souřadnice maxima z upraveného průběhu). Z upraveného průběhu výkonu v závislosti na odporu při zdánlivé rezonanční frekvenci byla určena optimální odporová zátěž (x-ová souřadnice maxima z upraveného průběhu).

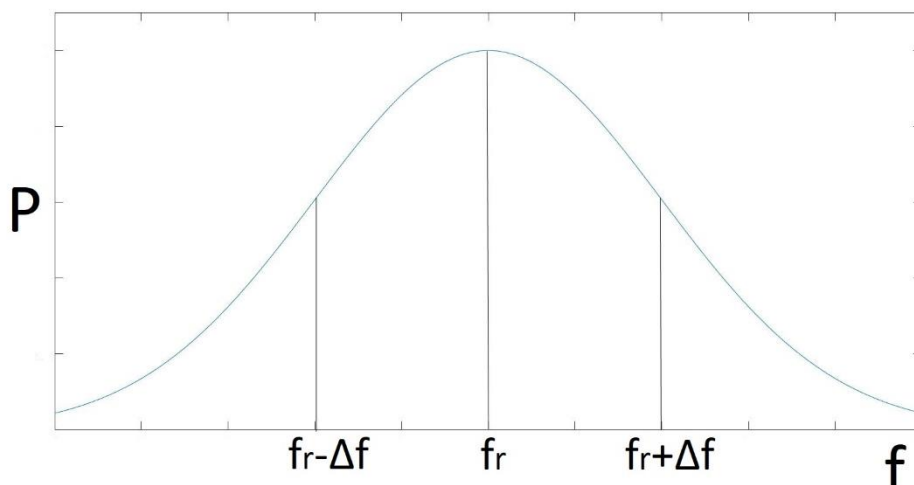
Maximální výkon energy harvesteru byl získán třemi možnými způsoby, a to přímo z naměřených dat, nebo jako maximum v upravených závislostech popsanych o odstavec výše. Po určení nejistoty maximálního výkonu by se měly intervaly všech tří určených hodnot překrývat.

Nejistoty výkonu a optimálního odporového zatížení jsou určeny pomocí vzorců, které jsou uvedeny v kapitole 6.3.

8.1.5 Určení stability maximálního výkonu

Tato programová část zpracovává upravenou závislost výkonu na frekvenci při zdánlivém optimálním odporovém výkonu, která byla popsána v kapitole 8.1.4.

Cílem je zkoumání, jak se mění hodnota integrálu výkonu v závislosti na velikosti okolí rezonanční frekvence. Toto zkoumání má velmi podobnou informační hodnotu jako činitel jakosti. Hodnota činitele jakosti je ovšem závislá na rychlosti poklesu výkonu s narůstající nebo klesající frekvencí od frekvence rezonanční, kdežto určení stability má dané okolí rezonanční frekvence, ve kterém je zkoumán průběh výkonu. To více koresponduje s reálnými zdroji vibrací, které je možné použít pro energy harvesting.



Obrázek 12 Rezonanční frekvence a její okolí pro určení stability maximálního výkonu

Zkoumané jsou tři oblasti, a to oblast:

- od dolního omezení okolí do horního omezení okolí,
- od dolního omezení okolí do rezonanční frekvence (pokles frekvence od frekvence rezonanční),
- od rezonanční frekvence do horního omezení okolí (nárůst frekvence od frekvence rezonanční).

Kombinací těchto tří oblastí je zkoumána celková stabilita výkonu a zda dochází k rychlejšímu poklesu výkonu při vzrůstající nebo klesající frekvenci. Pro určení stability jsou nutné oblasti s čistě poklesem frekvence nebo čistě s nárůstem frekvence od frekvence rezonanční z důvodu případné nesymetrie průběhu výkonu okolo maxima.

Ke každé oblasti jsou určeny tři hodnoty: integrál ideálního frekvenčně neměnného výkonu, integrál skutečného výkonu a procentuální hodnota skutečného výkonu oproti ideálnímu (neměnnému).

Integrál frekvenčně nezávislého výkonu je získán pomocí vzorců v závislosti na zkoumaném okolí

$$P_{konst} = P_{max} \cdot 2\Delta f [W] \quad (20)$$

nebo

$$P_{konst} = P_{max} \cdot \Delta f [W] \quad (21)$$

,kdy P_{konst} je integrál frekvenčně nezávislého výkonu, P_{max} je maximální výkon a Δf definuje okolí.

Integrál skutečného výkonu je získán pomocí vzorců v závislosti na zkoumaném okolí

$$P_{\Delta f} = \int_{f_r - \Delta f}^{f_r + \Delta f} P df [W] \quad (22)$$

nebo

$$P_{\Delta f} = \int_{f_r - \Delta f}^{f_r} P df [W] \quad (23)$$

nebo

$$P_{\Delta f} = \int_{f_r}^{f_r + \Delta f} P df [W] \quad (24)$$

,kdy $P_{\Delta f}$ je integrál skutečného frekvenčně závislého výkonu a P je výkon v závislosti na frekvenci.

Procentuální hodnota skutečného výkonu oproti ideálnímu (neměnnému) výkonu je určena pomocí vzorce

$$\delta_p = \frac{P_{\Delta f}}{P_{konst}} \cdot 100 [\%] \quad (25)$$

Tyto výpočty jsou určeny pro dvě okolí rezonanční frekvence, a to $\pm 0,5$ Hz a ± 1 Hz.

8.2 Program pro zpracování dat ze systému měření při zatěžování impulzním signálem síly

Tento program zpracovává data získaná ze systému měření popsaného v kapitole 7 a jeho hlavním výstupem je zjištění přenesené energie při impulzním zatížení piezoelektrického energy harvesteru.

Po vybrání příslušného TDMS souboru s daty je uživatelem na základě zobrazených průběhů síly a napětí nastaven počet impulzů síly a interval hodnot dat, který je dále zpracováván pro každý jednotlivý impulz.

Interval může být definován pomocí:

- počátku impulzu síly a počátku prvního zákmitu síly (viz Obrázek 11),
- počátku impulzu síly a času.

Při prvním způsobu ohraničení může být z vyobrazeném průběhu napětí zjištěno, zda má piezoelektrický prvek natolik velkou setrvačnost, že generované napětí

není ustáleno při zákmitu síly. V takovém případě není možné nijak dále zkracovat interval pro minimalizaci vlivu šumu na celkovou přenesenou energii za daný čas. V případě, že dochází k ustálení napětí na přibližně nulovou hodnotu před koncem vybraného intervalu, je z vyobrazeného průběhu napětí získán čas přibližného ustálení, který je použit při druhém způsobu ohraničení. Toto ohraničení má za snahu co nejvíce minimalizovat vliv šumu.

Z důvodu použití obyčejných odporů bez krytí v systému měření pro nastavení optimálního odporového zatížení jsou získaná data ovlivněna harmonickou složkou 50 Hz, která vzniká z okolích přístrojů. Pro její co možná nejlepší eliminaci je změřený signál napětí filtrován pomocí Butterworthova filtru pátého řádu v nastavení pásmové zadržky.

Výslednými hodnotami z programu zpracovávající data pro každý zpracovávaný impulz síly je:

- maximum impulzu síly,
- přenesená energie za definovaný časový interval,
- délka zpracovávaného časového intervalu.

Délka zpracovávaného časového intervalu je pomocná informace pro zjednodušení zpracování dat. Je důležitý zejména u prvního typu určení zpracovávaných hodnot (počátek silového impulzu a počátek zákmitu síly), jelikož ukazuje časovou délku tohoto ohraničení.

Dále je vytvořen pomocí programu MATLAB graf zobrazující průběh měřeného napětí v uživatelem zadaném intervalu zpracovávaných hodnot.

9 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Pomocí vytvořených systému měření bylo proměřeno pět piezoelektrických prvků, konkrétně prvky DT1-028KL, DT1-052K, DT2-028K, LDT1-028K a LDT2-028K od výrobce SENZOR SOLUTIONS TE Connectivity. V následujících kapitolách jsou rozebrána naměřená data jednotlivých prvků.

Všechny naměřené průběhy a výsledky z harmonického systému měření jsou k nalezení v přílohách, v dalších kapitolách u každého piezoelektrického prvku je pro názornost vyobrazen jeden průběh a tabulka se shrnutím výsledných výkonových parametrů.

Jelikož u impulzního systému měření nebylo dosaženo vhodné opakovatelnosti měření, vyobrazené závislosti u každého prvku jsou pouze názorné, neudávají přesný a vždy opakující se průběh generovaného napětí při zatížení piezoelektrického energy harvesteru impulzem síly o dané velikosti.

U některých závislostí (příkladem u závislosti v obrázku 14) můžeme pozorovat nehladké průběhy, které nejsou dány skutečným chováním konkrétních piezoelektrických prvků, vznikají spíše z nepřesností měření.

Jelikož zejména při měření s harmonickým buzením bylo měření prováděno v přibližném okolí rezonanční frekvence, kdy nebyla známa přesná závislost výkonu na frekvenci, některé měření byly provedeny ve zbytečně velkém frekvenčním rozsahu. Z takovýchto měření nebylo vhodné určovat zejména činitel jakosti, kvůli možnému malému vzorku dat, kdy výkony dosahovaly hodnot nad polovinu maxima. Pro určení činitele jakosti byly tedy použity zejména ty měření, kdy docházelo k věrnému proložení naměřených dat splinem.

9.1 Piezoelektrický prvek DT1-028K/L

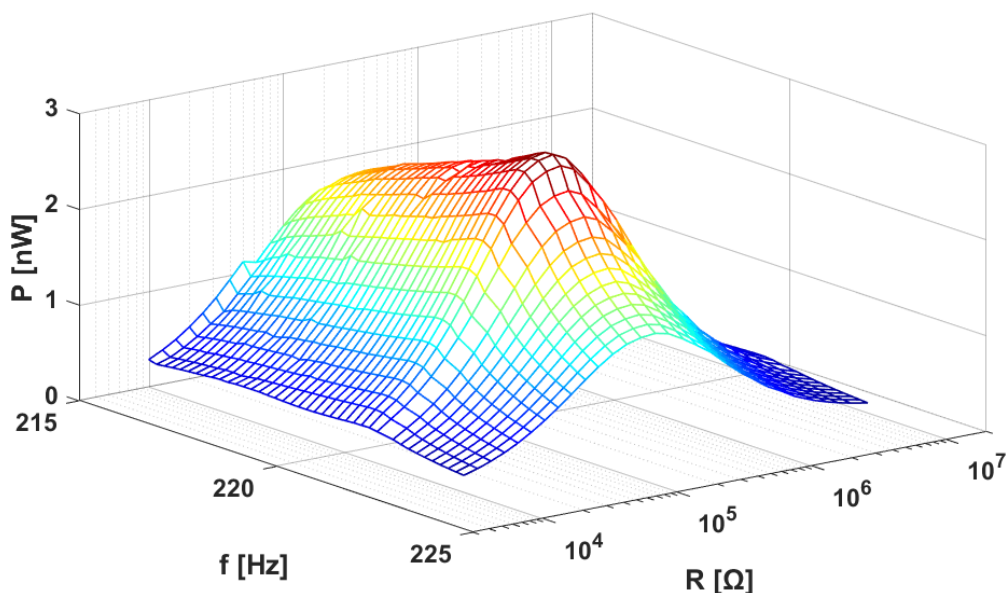
Pomocí měření při zatížení harmonickým signálem byly do frekvence 300 Hz detekovány dvě rezonanční frekvence, a to přibližně 220 Hz a 251 Hz, přičemž větší výkon dosahoval piezoelektrický prvek při druhé rezonanční frekvenci.

Pro názornost naměřeného průběhu výkonu ze systému měření při zatížení piezoelektrického prvku harmonickým signálem síly byly zvoleny grafické závislosti z měření s amplitudou síly $4 N_{rms}$ ve frekvenčním rozsahu 215-223 Hz (Obrázek 13) a z měření s amplitudou síly $4 N_{rms}$ ve frekvenčním rozsahu 235-265 Hz (Obrázek 14).

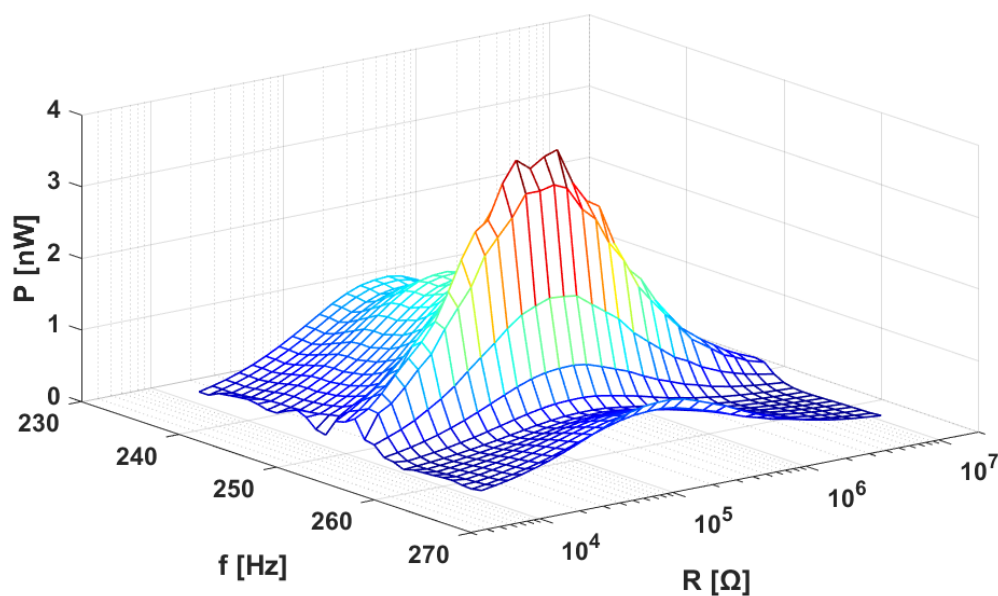
Po zhodnocení všech měření byly pro obě rezonanční frekvence určeny výkonové parametry, které jsou uvedeny v následující tabulce 3.

Tabulka 3 Výkonové parametry prvku DT1-028K/L z harmonického měření

Rezonanční frekvence [Hz]	Činitel jakosti [-]	Optimální odporové zatížení [kΩ]	Maximální výkon [nW]
219,7-220,3	~12,8	249 ± 4	2,78±0,09 (při 4 N _{rms})
250,7-251,0	~16,3		3,73±0,10 (při 4 N _{rms})



Obrázek 13 Okolí 1. detekované f_r prvku DT1-028K/L při harmonickém zatížení



Obrázek 14 Okolí 2. detekované f_r prvku DT1-028K/L při harmonickém zatížení

Optimální odporové zatížení bylo určeno z měření v okolí první rezonanční frekvence, jelikož při měření v okolí druhé rezonanční frekvence došlo pravděpodobně vlivem šumu k nestandardnímu průběhu výkonu při rezonanční

frekvenci v závislosti na odporu (viz v obrázku 14 je viditelný pokles výkonu v místě, kdy je očekáváno maximum). Tyto nestandardní průběhy ovšem neměly velký vliv na parametrizování piezoelektrického prvku. Optimální odporové zatížení je sice frekvenčně závislé, ovšem změny optimálního odporového zatížení se nepohybují v takových hodnotách, aby při změně několika desítek Hz došlo ke změně optimálního odporového zatížení v řádu k Ω . [1,6] Dále odchylka zjištěného maximálního výkonu od skutečného odhadem nebude zásadně větší než nejistota měření.

Hodnoty činitele jakosti byly získány z těch měření, kdy interpolace průběhu výkonu v závislosti na budící frekvenci při optimálním odporovém zatížení co nejvěrněji sledovala naměřené hodnoty.

V obou oblastech rezonanční frekvence $\pm 0,5$ Hz došlo pouze k nepatrnému poklesu výkonu o jednotky procent (maximální pokles 4 %) od ideálního frekvenčně nezávislého průběhu výkonu, přičemž výkon měl přibližně stejnou hodnotu poklesu v oblastech poklesu i nárůstu frekvence od frekvence rezonanční. V oblastech rezonanční frekvence ± 1 Hz už docházelo k rychlejšímu poklesu výkonu při narůstající frekvenci od frekvence rezonanční (při nárůstu frekvence maximální pokles 10 % oproti maximálnímu poklesu 5 % při poklesu frekvence). Přesnější hodnoty jsou k nalezení v tabulce A 2 a tabulce A 3.

Průběh poklesů výkonů v okolí první a druhé rezonanční frekvence se od sebe liší pouze minimálně.

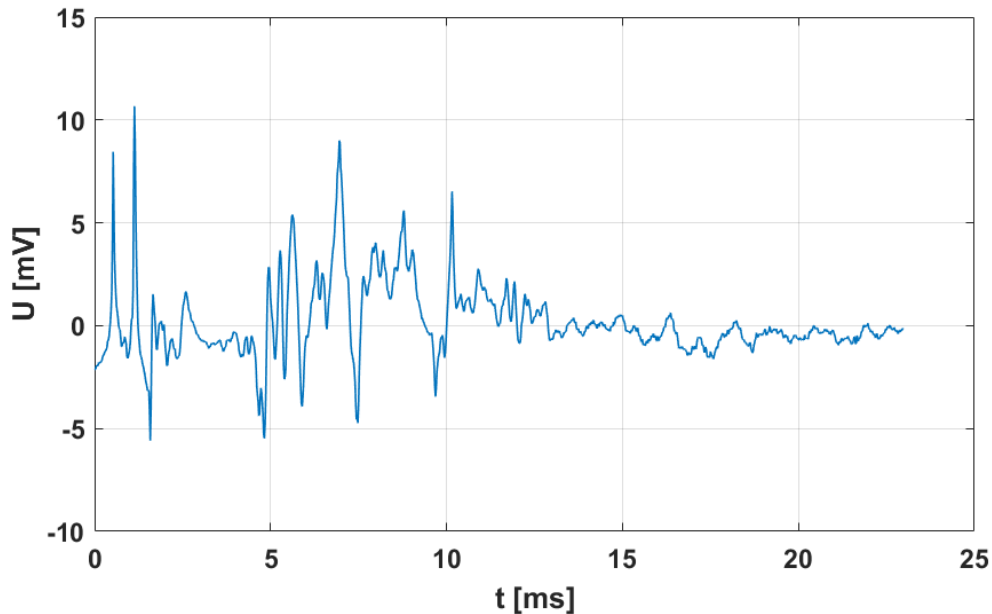
V následující tabulce 4 jsou uvedeny hodnoty přenesené energie jednotlivých měření.

Tabulka 4 Přenesená energie prvku DT1-028KL na jeden impuls při R = 249 k Ω , délka měření 23 ms

Impulz síly [N]	Přenesená energie na 1 impuls [f]
253	0,257
261	0,237
272	0,199
273	0,397
305	0,299

Z tabulky je patrné, že vyhodnocené hodnoty přenesené energie na jeden impuls síly nerostou konstantně se zvětšujícím se impulzem síly. Z grafických průběhů napětí bylo možno vypořadovat, že docházelo u každého měření k odlišným průběhům napětí. Tyto odlišnosti mohly vzniknout nedostatečnou vzorkovací frekvencí, jiným vlivem okolí na rušivé složky okolo 50 Hz nebo mírným posunutím piezoelektrického prvku při měření, a tedy proměnlivou aktivní plochou energy harvesteru. Z dat jde ale určit, že přenesená energie při impulzu

síly 300 N se pohybuje v desetinách fJ. Takto nízké hodnoty odpovídají vysoké optimální odporové zátěži prvku, na kterém probíhalo měření.



Obrázek 15 Názorný průběh generovaného napětí prvkem DT1-028KL, impuls síly 305 N

9.2 Piezoelektrický prvek DT1-052K

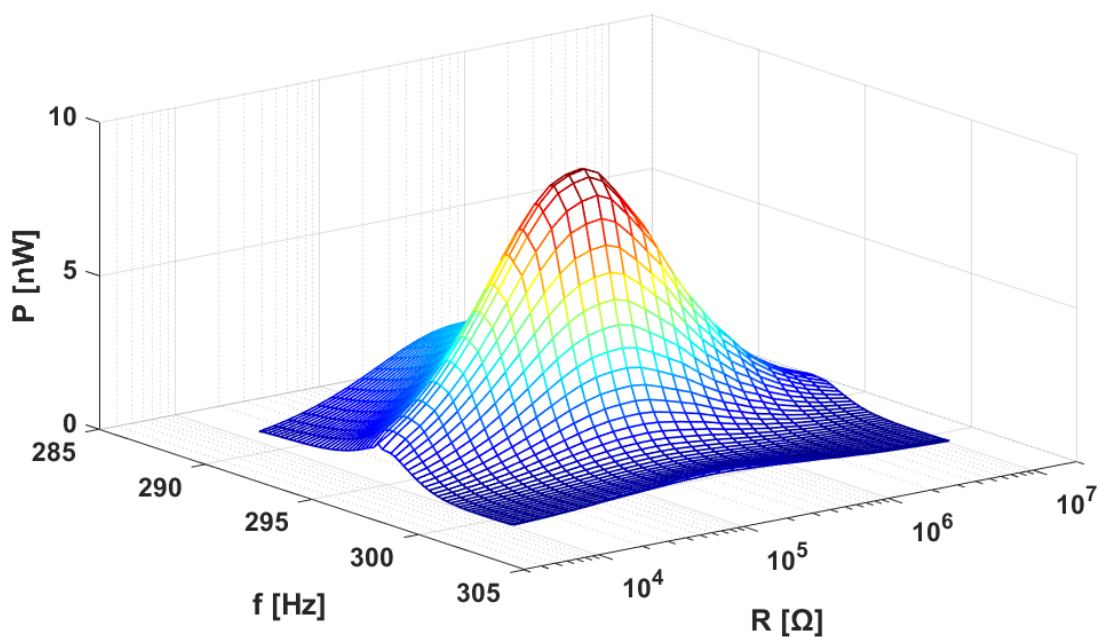
Pomocí měření při zatížení harmonickým signálem byla do frekvence 301 Hz detekována rezonanční frekvence, a to přibližně 295 Hz.

Pro názornost naměřeného průběhu výkonu ze systému měření při zatížení piezoelektrického prvku harmonickým signálem síly byly zvoleny grafické závislosti z měření s amplitudou síly $5 N_{rms}$ ve frekvenčním rozsahu 289-301 Hz (Obrázek 16).

Po zhodnocení všech měření byly určeny výkonové parametry, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 5 Výkonové parametry prvku DT1-052K z harmonického měření

Rezonanční frekvence [Hz]	Činitel jakosti [-]	Optimální odporové zatížení [$k\Omega$]	Maximální výkon [nW]
294,5-294,9	74,6-79,1	249 ± 4	$4,9 \pm 0,1$ (při $3 N_{rms}$)



Obrázek 16 Okolí detekované f_r prvku DT1-052K při harmonickém zatížení

Hodnoty rezonanční frekvence z měření se pohybovaly v intervalu 294,5-294,9 Hz. Odchytky těchto měření mezi sebou jsou natolik malé (maximální relativní chyba 0,13 %), že všechny výsledky můžeme považovat za správné, ovšem pro lepší vyhodnocení chybí hodnota nejistoty měření. Stejně tak tomu je i u činitele jakosti, kdy maximální relativní chyba je 6 %.

U optimálního odporového zatížení je nejistota měření známa, avšak rozdíly zjištěných hodnot se pohybovaly v řádech do 1 k Ω a zjištěná hodnota ze všech měření byla 249 k Ω .

V obou oblastech ($f_r \pm 0,5$ Hz a $f_r \pm 1$ Hz) docházelo přibližně k symetrickým vývojům výkonu při poklesu i nárůstu frekvence od frekvence rezonanční. V oblasti $f_r \pm 0,5$ Hz se pohyboval celkový pokles výkonu okolo 3 % (2-3 %), tuto hodnotu měly tedy i poklesy výkonu při narůstající nebo při klesající frekvenci.

V oblasti $f_r \pm 1$ Hz se pohyboval celkový pokles výkonu okolo 10 % (8-12 %).

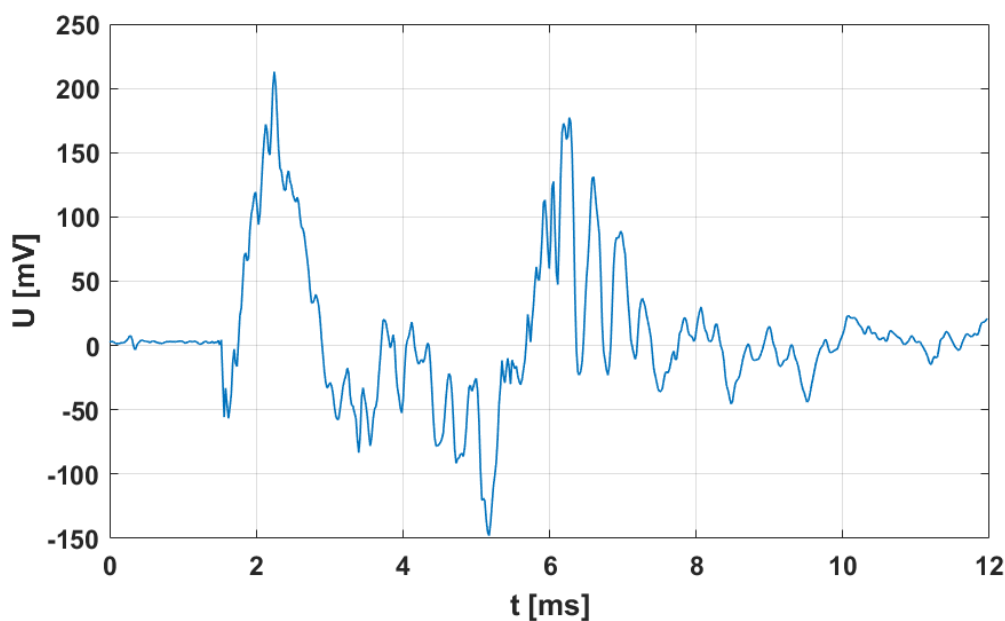
Přesnější hodnoty jsou k nalezení v tabulce A 4 a tabulce A 5.

V následující tabulce 6 jsou uvedeny hodnoty přenesené energie jednotlivých měření.

Tabulka 6 Přenesená energie prvku DT1-052K na jeden impuls při $R = 249 \text{ k}\Omega$, délka měření 12 ms

Impulz síly [N]	Přenesená energie na 1 impuls [fj]
220	105
240	116
281	143
301	179
305	231

Měřená přenesená energie na jeden impuls síly rostla s narůstající velikostí silového impulsu. Z důvodu, že tomu tak není u měření ostatních piezoelektrických prvků, se pravděpodobně jedná o náhodu. Stejně jako u ostatních piezoelektrických prvků tedy měření neurčuje konkrétní hodnoty, ale řád energie, která je přenesena při silovém impulsu 300 N. Přenesená energie při silovém impulsu o této velikosti se pohybuje ve stovkách fj.



Obrázek 17 Názorný průběh generovaného napětí prvkem DT1-052K, impuls síly 281 N

9.3 Piezoelektrický prvek DT2-028K

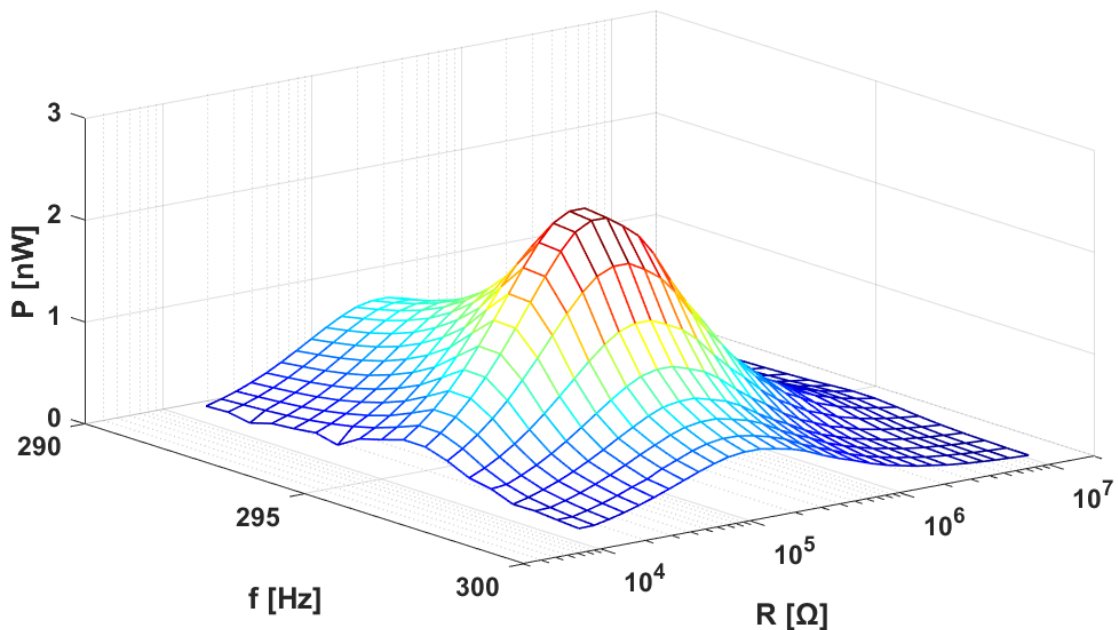
Pomocí měření při zatížení harmonickým signálem byla do frekvence 351 Hz detekována rezonanční frekvence, a to přibližně 296 Hz.

Pro názornost naměřeného průběhu výkonu ze systému měření při zatížení piezoelektrického prvku harmonickým signálem síly bylo zvoleny grafické závislosti z měření s amplitudou síly 3 N_{rms} ve frekvenčním rozsahu 291-300 Hz. (Obrázek 18)

Po zhodnocení všech měření byly určeny výkonové parametry, které jsou uvedeny v následující tabulce 7.

Tabulka 7 Výkonové parametry prvku DT2-028K z harmonického měření

Rezonanční frekvence [Hz]	Činitel jakosti [-]	Optimální odporové zatížení [kΩ]	Maximální výkon [nW]
295,7-296,3	~69,6	143 ± 3	2,4±0,1 (při 3 N _{rms})



Obrázek 18 Okolí detekované f_r prvku DT2-028K při harmonickém zatížení

Hodnoty rezonanční frekvence z měření se pohybovaly v intervalu 295,7-296,3 Hz. Stejně jako u piezoelektrického prvku DT1-052K jsou odchylky získaných hodnot od sebe velmi malé (maximální relativní chyba 0,20 %).

Během tří měření došlo k velkým odchylkám v rámci určeného činitele jakosti. U měření v rozsahu 294-300 Hz vznikla chyba, jelikož při frekvenci 294 Hz již byl generovaný výkon větší než polovina výkonu maximálního. Dále při měření ve frekvenčním rozsahu 291-300 Hz při síle 2 N_{rms} byla hodnota činitele jakosti větší než u předchozího chybného měření, což indikuje nekorektně získanou hodnotu činitele jakosti. Hodnota činitele jakosti byla tedy určena z měření ve frekvenčním rozsahu 291-300 Hz při síle 3 N_{rms}.

Rozdíly mezi jednotlivými určenými optimálními odporovými zatíženími nebyly větší než nejistota měření.

V oblasti $f_r \pm 0,5$ Hz docházelo přibližně k symetrickým vývojem výkonu při poklesu i nárůstu frekvence od frekvence rezonanční, celkový pokles výkonu se

pohyboval okolo 3 % (3-4 %), tuto hodnotu měly tedy i poklesy výkonu při narůstající nebo při klesající frekvenci.

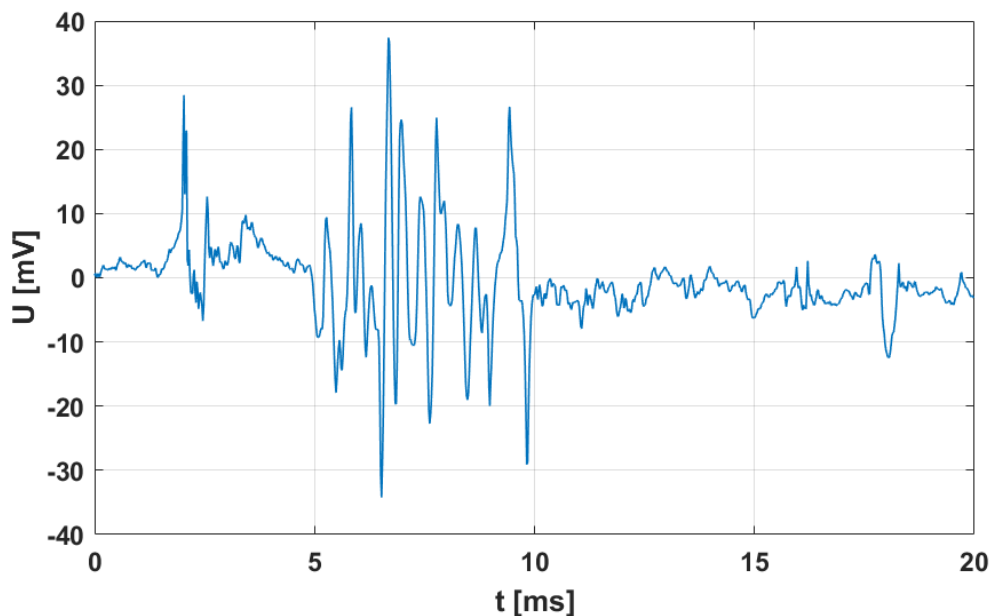
V oblasti $f_r \pm 1$ Hz docházelo k rychlejšímu poklesu výkonu při narůstající frekvenci od frekvence rezonanční, kdy pokles byl o 1-2 % větší než u klesání frekvence. Při klesání frekvence se pokles výkonu pohyboval lehce pod 10 % (9-10 %), u narůstající frekvenci se pokles výkonu pohyboval lehce nad 10 % (10-14 %). Přesnější hodnoty jsou k nalezení v tabulce A 6 a tabulce A 7.

V následující tabulce 8 jsou uvedeny hodnoty přenesené energie jednotlivých měření.

Tabulka 8 Přenesená energie prvku DT2-028K na jeden impuls při $R = 143 \text{ k}\Omega$, délka měření 20 ms

Impuls síly [N]	Přenesená energie na 1 impuls [fj]
252	8,14
279	7,82
280	19,0
298	11,8
306	15,6

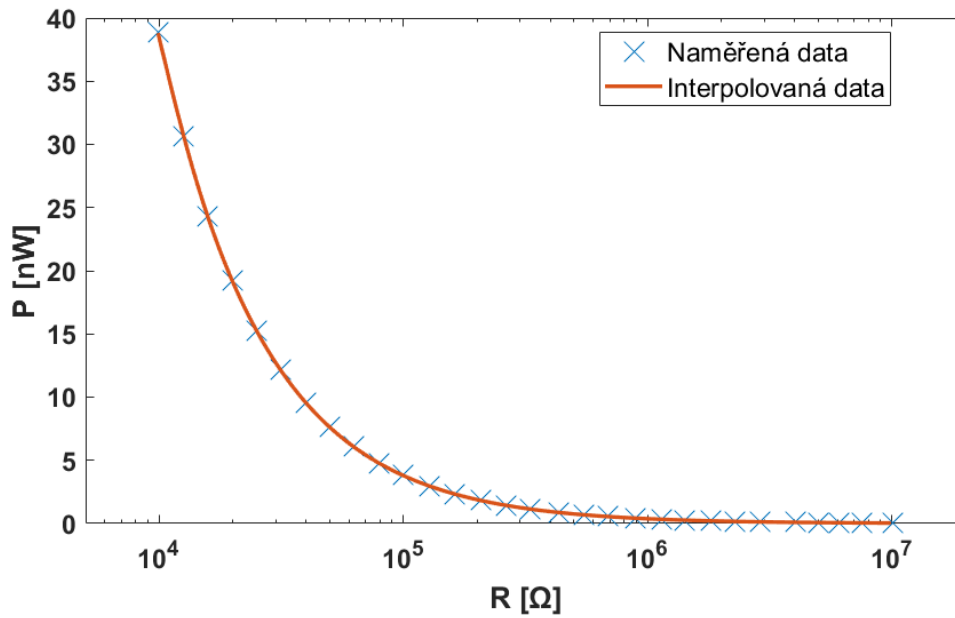
Z tabulky je patrné, že vyhodnocené hodnoty přenesené energie na jeden impuls síly nerostou konstantně se zvětšujícím se impulzem síly. Z grafických průběhů napětí bylo možno vypočítat, že docházelo u každého měření k odlišným průběhům napětí. Z dat jde ale určit, že přenesená energie při impulsu síly 300 N se pohybuje lehce nad deset fj.



Obrázek 19 Názorný průběh generovaného napětí prvkem DT2-028K, impuls síly 279 N

9.4 Piezoelektrický prvek LDT1-028K

Při zpracovávání naměřených dat ze systému měření při zatížení harmonickou silou síly bylo zjištěno, že výkon piezoelektrického prvku LDT1-028K s klesajícím odporovým zatížením exponenciálně narůstá. Názorná ukázka je vyobrazena na obrázku 20.



Obrázek 20 Výkon měřeného piezoelektrického prvku LDT1-028K v závislosti na odporu

Tento průběh výkonu není standartní pro PVDF fólie (LDT1-028K) a měření je tedy chybné. Vzhledem k tomu, že všechna provedená měření na tomto prvku měla stejný nestandardní průběh výkonu v závislosti na odporu, nebyla chyba v měření. Chyba tedy byla v použitém prvku LDT1-028K, který byl pravděpodobně poškozen.

9.5 Piezoelektrický prvek LDT2-028K

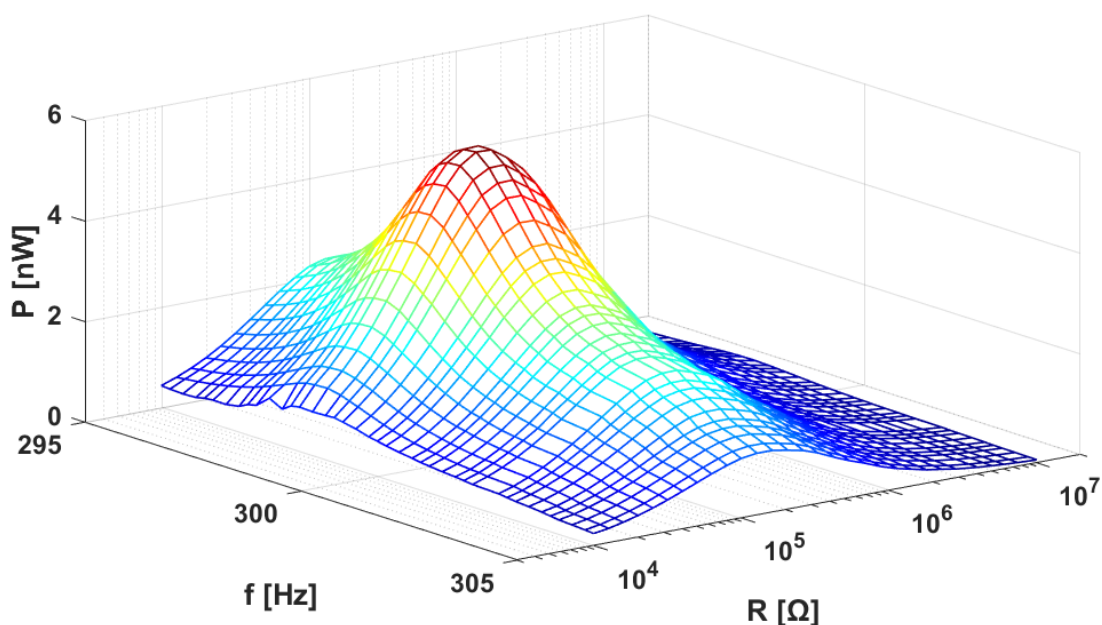
Pomocí měření při zatížení harmonickým signálem byla do frekvence 351 Hz detekována rezonanční frekvence, a to přibližně 298 Hz.

Pro názornost naměřeného průběhu výkonu ze systému měření při zatížení piezoelektrického prvku harmonickým signálem síly byly zvoleny grafické závislosti z měření s amplitudou síly 3 N_{rms} ve frekvenčním rozsahu 295-305 Hz. (Obrázek 21)

Po zhodnocení všech měření byly určeny výkonové parametry, které jsou uvedeny v následující tabulce 9.

Tabulka 9 Výkonové parametry prvku LDT2-028K z harmonického měření

Rezonanční frekvence [Hz]	Činitel jakosti [-]	Optimální odporové zatížení [kΩ]	Maximální výkon [nW]
298,0-298,4	48,7-55,2	143 ± 3	5,5±0,2 (při 3 N _{rms})



Obrázek 21 Okolí detekované f_r prvku LDT2-028K při harmonickém zatížení

Hodnoty rezonanční frekvence z měření se pohybovaly v intervalu 298,0-298,4 Hz., odchylky získaných hodnot jsou od sebe tedy velmi malé (maximální relativní chyba 0,13 %).

Pro určení činitele jakosti nebylo použito měření ve frekvenčním rozsahu 285 – 309 Hz, jelikož toto měření se ukázalo jako zbytečně frekvenčně široké a tudíž nevhodné pro určení hodnoty činitele jakosti (viz kapitola 9). Maximální relativní chyba činitele jakosti ze zbylých měření je 13,3 % a určená hodnota není úplně přesná, ovšem pro další porovnání s ostatními měřeními piezoelektrickými prvky je postačující.

Rozdíly mezi jednotlivými určenými optimálními odporovými zatíženími nebyly větší než nejistota měření.

V obou oblastech ($f_r \pm 0,5$ Hz a $f_r \pm 1$ Hz) docházelo přibližně k symetrickým vývojem výkonu při poklesu i nárůstu frekvence od frekvence rezonanční. V oblasti $f_r \pm 0,5$ Hz se pohyboval celkový pokles výkonu okolo 2 % (2-3 %), tuto hodnotu měly tedy i poklesy výkonu při narůstající nebo při klesající frekvenci.

V oblasti $f_r \pm 1$ Hz se pohyboval celkový pokles výkonu okolo 7 % (6-8 %).

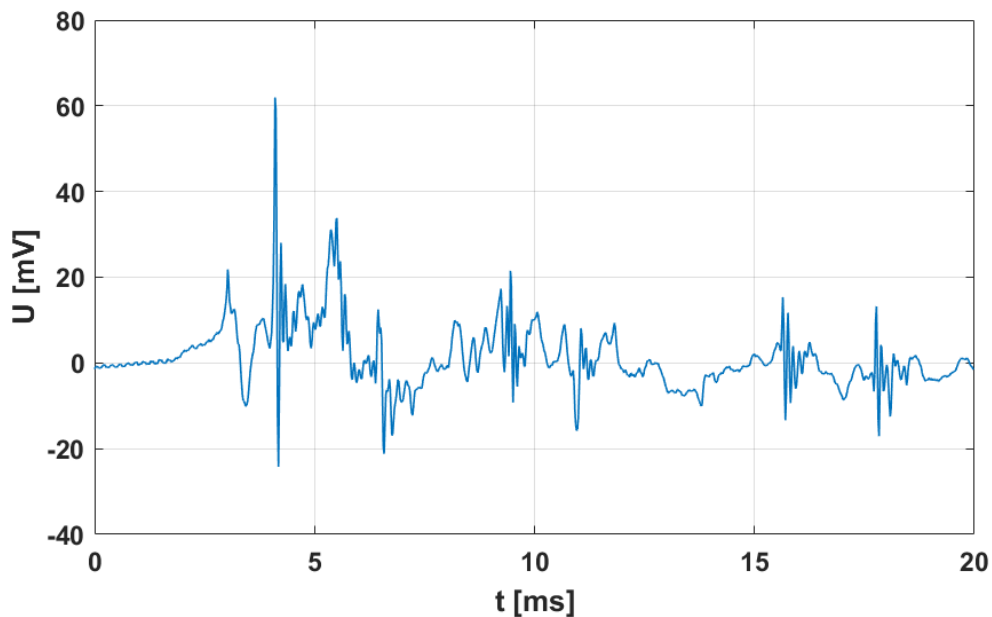
Přesnější hodnoty jsou k nalezení v tabulce A 8 a tabulce A 9.

V následující tabulce 10 jsou uvedeny hodnoty přenesené energie jednotlivých měření.

Tabulka 10 Přenesená energie prvku LDT2-028K na jeden impuls při $R = 143 \text{ k}\Omega$, délka měření 20 ms

Impulz síly [N]	Přenesená energie na 1 impuls [fJ]
306	7,71
316	9,77
340	7,92
349	8,69
356	8,85

Z tabulky je patrné, že vyhodnocené hodnoty přenesené energie na jeden impuls síly nerostou konstantně se zvětšujícím se impulzem síly. Z grafických průběhů napětí bylo možno vypožorovat, že docházelo u každého měření k odlišným průběhům napětí. Z dat jde ale určit, že přenesená energie při impulsu se pohybuje v jednotkách fJ.



Obrázek 22 Názorný průběh generovaného napětí prvkem LDT2-028K, impuls síly 340 N

9.6 Srovnání měřených piezoelektrických prvků

Největší výkon při rezonanční frekvenci a optimálním odporovém zatížení byl určen u piezoelektrického prvku LDT2-028K ($5,5 \pm 0,2 \text{ nW}$ při 3 N_{rms}) následovaný prvkem DT1-052K ($4,9 \pm 0,1 \text{ nW}$ při 3 N_{rms}). Nejmenší výkony byly při harmonickém zatížení naopak u piezoelektrických prvků DT1-028KL a DT2-028K ($2,4 \pm 0,1 \text{ nW}$ při 3 N_{rms}).

U prvku DT1-028KL bylo provedené měření při 3 N_{rms} chybné z důvodu špatného frekvenčního rozsahu, a tedy pro přibližné stanovení maximálního výkonu při 3 N_{rms} je třeba odvodit z ostatních měření. U měření při 4 N_{rms} měl prvek maximální výkon $3,73 \pm 0,10$ nW, tedy při zatížení signálem o amplitudě 3 N_{rms} by došlo k poklesu maximálního výkonu maximálně o 1,27 nW (maximální výkon při 5 N_{rms} $5,0 \pm 0,1$ nW).

Rezonanční frekvence piezoelektrických prvků DT1-052K, DT2-028K a LDT2-028K se pohybovaly v těsné blízkosti mezi 295 a 298 Hz, výjimkou byl prvek DT1-028KL, u kterého byly detekovány dvě rezonanční frekvence do 300 Hz – 220 Hz a 251 Hz, přičemž u rezonanční frekvence 251 Hz docházelo k většímu výkonu než u frekvence 220 Hz.

Z hlediska optimálního odporového zatížení se naměřené prvky rozdělily do dvou skupin. Prvky DT2-028K a LDT2-028K měly optimální odporové zatížení 143 ± 3 k Ω a prvky DT1-028KL a DT1-052K 249 ± 4 k Ω .

Největší hodnoty činitele jakosti prokazovaly prvky DT1-052K a DT2-028K, které ale neprokázaly nejlepší stabilitu v okolí rezonanční frekvence. V oblasti rezonanční frekvence $\pm 0,5$ Hz měly všechny prvky přibližně stejné hodnoty stability, kdy docházelo k výkonovým poklesům 2-4 %. U stability se piezoelektrické prvky začaly odlišovat až v oblasti rezonanční frekvence ± 1 Hz, kdy nejlepší stabilitu prokázal prvek LDT2-028K (přibližně symetrický pokles 6-8 %). Nejhorší stabilitu výkonu v této oblasti prokázal prvek DT2-028K s nesymetrickým poklesem okolo rezonanční frekvence, kdy při snižování frekvence docházelo k výkonovému poklesu 9-10 % a při nárůstu frekvence k poklesu 10-14 %.

Přibližně k symetrickým výkonovým poklesům v obou oblastech ($f_r \pm 0,5$ Hz a $f_r \pm 1$ Hz) docházelo u prvků DT1-028KL a LDT2-028K.

Kombinací hodnot činitele jakosti a stability výkonového maxima se ukázal jako nejméně stabilní piezoelektrický prvek DT1-028KL, který měl v oblastech okolo obou rezonančních frekvencí nízké hodnoty stability i činitele jakosti.

Při impulzním zatížení docházelo k největší přenesené energii na jeden impulz u prvku DT1-052K, přičemž měření probíhalo na optimálním odporovém zatížení, které mělo větší hodnotu než u prvků DT2-028K a LDT2-028K. Přenesená energie na jeden silový impulz 300 N se pohybovala v řádu stovek fJ. Naopak nejnižší hodnoty přenesené energie na jeden impulz síly prokázal prvek DT1-028KL, kdy přenesená energie na jeden impulz síly 300 N se pohybovala v desetinách fJ. Podobné hodnoty přenesené energie na impulz síly 300 N prokazovaly prvky DT2-028K a LDT2-028K (jednotky fJ).

ZÁVĚR

V rámci práce byly teoreticky rozebrány různé způsoby měření výkonových parametrů piezoelektrických energy harvesterů, které umožňují jejich parametrizaci pro určení vhodnosti použití jako zdroje elektrické energie v obvodech. Z popsaných systémů měření byly vytvořeny a zprovozněny dva systémy měření, které jsou založené na silovém působení na piezoelektrické energy harvestery, konkrétně systémy měření při zatížení harmonickým signálem síly a při zatížení silovým impulzem. Pro tyto dva systémy byl dále vytvořen příslušný program, který využívá z nich získaná data pro určení výkonových parametrů. Určené parametry jsou činitel jakosti, rezonanční frekvence, optimální odporové zatížení, maximální výkon a přenesená energie při jednom silovém impulzu. Dále byla při harmonickém měření zkoumána výkonová stabilita, která má za cíl popsání chování výkonu při optimálním odporovém zatížení v blízkém okolí rezonanční frekvence. Ideálním pokračováním této části by bylo spojení této informace s frekvenční stabilitou konkrétní mechanické části, která by zajišťovala generaci harmonického signálu v rámci energy harvesting.

Pomocí vytvořených systémů bylo proměřeno pět piezoelektrických prvků, konkrétně prvky DT1-028KL, DT1-052K, DT2-028K, LDT1-028K a LDT2-028K. Prvek LDT1-028K byl ale vadný, a tudíž z měření získaná data nijak neodpovídají o vlastnostech prvku. Při zatížení harmonickým signálem síly o velikosti jednotek N_{rms} se pohybovaly výkonové výstupy všech měřených piezoelektrických prvků (kromě vadného LDT1-028K) v jednotkách nW. Největší výkon při optimální odporové zátěži a rezonanční frekvenci prokázal prvek LDT2-028K, který zároveň prokázal nejlepší výkonovou stabilitu v okolí rezonanční frekvence. Největší hodnoty činitele jakosti ale prokazovaly prvky DT1-052K a DT2-028K. Došlo ke sdružení piezoelektrických prvků z pohledu optimální odporové zátěže, která pro jednotlivé prvky nabývala hodnoty $143 \pm 3 \text{ k}\Omega$ nebo $249 \pm 4 \text{ k}\Omega$. Při impulzním zatížení se přenesené energie při jednom impulzu síly o velikosti 300 N pohybovaly od stovek do desetin fJ, přičemž největší přenesenou energii na pulz prokázal prvek DT-052K. Detailnější porovnání prvků je k nalezení v kapitole 9.6.

Veškerá měření byla prováděna v laboratorních podmínkách. U systému měření by neměly mít jiné okolní podmínky měření (tlak, teplota, vlhkost) zásadní vliv na určené hodnoty jednotlivých výkonových parametrů za předpokladu, že podmínky jsou stabilní. Pokud by například docházelo k prudkým změnám teploty v okolí měření, získaná data by byla touto skutečností ovlivněna.

Vytvořený systém měření při impulzním zatížení se ukázal jako nepřesný, kdy jeho hlavní informace se omezila na přibližné odhadnutí velikosti přenesené energie při impulzu síly, nikoliv přesné vyčíslení.

Literatura

- [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] Piezoelektrický jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/418-piezoelektricky-jev>
- [3] ČSN EN 50324-1. *Piezoelektrické vlastnosti keramických materiálů a součástí – Část 1: Termíny a definice*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [4] BAOYUAN, Sun, Wu JIANTONG, Zhang JUN a Qian MIN. *A new model describing physical effects in crystals: the diagrammatic and analytic methods for macro-phenomenological theory*. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2003, 139(1-3), 444-447 [cit. 2019-11-03]. DOI: 10.1016/S0924-0136(03)00546-6. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013603005466>
- [5] *Piezoelektrické jevy: Základy piezoelektrických jevů a jejich aplikace v moderních technologiích*. FS ČVUT, 2012. Dostupné také z: http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_11.pdf
- [6] ERTURK, Alper a D. J. INMAN. *Piezoelectric energy harvesting*. Chichester: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-68254-8.
- [7] 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.ymssp.2007.09.015. ISSN 08883270. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327007001951>
- [8] 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>
- [9] Piezo Terminolog & Glossary. *Piezo* [online]. [cit. 2019-11-17]. Dostupné z: <https://piezo.com/pages/piezo-terminology-glossary#relat>
- [10] PIEZO THEORY. *APC International* [online]. [cit. 2019-11-22]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory.html>
- [11] 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/>
- [12] SEDLÁČEK, J., J. VALSA. *Elektrotechnika II*. FEKT VUT, Brno 2018.
- [13] D33 PiezoMeter Systems. *PIEZOTEST: PRECISION ON DEMAND* [online]. [cit. 2019-12-08]. Dostupné z: <http://www.piezotest.com/d33piezometer.php>
- [14] ERHART, Jiří a Lidmila BURIANOVÁ. What is really measured on a d33-meter? *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2001, **21**(10-11), 1413-1415 [cit. 2019-12-08]. DOI: 10.1016/S0955-2219(01)00030-9. ISSN 09552219. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0955221901000309>
- [15] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI USB-9234 USER GUIDE AND SPECIFICATIONS* [online]. [cit. 2020-01-01]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/372307a.pdf>
- [16] RIPKA, Pavel, Stanislav ĎAKO, Marek KREIDL a Jiří NOVÁK. *Senzory a převodníky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3123-3.
- [17] KEYSIGHT. *Keysight 34401A 6½ Digit Multimeter – datasheet* [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/34401-90013.pdf>
- [18] BILÍK, Šimon. *Kalibrace rázového kladívka*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119269>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Petr Beneš
- [19] ENDEVCO. *Model 2302 Modal hammer – datasheet* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: http://www.hoskinscientifique.com/uploadpdf/Instrumentation/Endevco/hoskin_2302_4a8302f8c1456.pdf
- [20] NATIONAL INSTRUMENTS. *Understanding FFTs and Windowing* [online]. [cit. 2019-12-22]. Dostupné z: <https://download.ni.com/evaluation/pxi/Understanding%20FFTs%20and%20Windowing.pdf>

Seznam příloh

A. Tabulky určených výkonových parametrů z měření.....	49
B. Naměřené průběhy	52
C. CD.....	72

A. Tabulky určených výkonových parametrů z měření

Tabulka A 1 Určené výkonové parametry ze systému měření při zatížení harvesterů harmonickým signálem síly pro jednotlivých měření

přípravek	síla [N _{rms}]	Frekvenční rozsah [Hz]	P _{max} [nW]	f _r [Hz]	Q [-]	R _{opt} [kΩ]	THD max [%]
DT1-028KL	4	205-235	2,80±0,09	219,73	12,84	249±4	0,11
DT1-028KL	4	215-223	2,78±0,09	220,30	28,87	249±4	0,11
DT1-028KL	4	235-265	3,73±0,10	251,04	36,97	299±5	0,08
DT1-028KL	5	235-265	5,0±0,1	250,7	16,27	197±3	0,11
DT1-052K	3	287-303	4,9±0,1	294,97	79,08	249±4	0,10
DT1-052K	4	287-303	6,0±0,1	294,52	74,56	249±4	0,09
DT1-052K	5	289-301	8,9±0,2	294,54	76,11	249±4	0,12
DT2-028K	2	291-300	1,35±0,08	296,30	93,47	140±3	0,09
DT2-028K	3	291-300	2,4±0,1	295,69	69,57	143±3	0,11
DT2-028K	3	294-300	2,4±0,1	295,80	87,26	143±3	0,11
LDT2-028K	4	285-309	9,8±0,3	298,09	43,20	143±3	0,10
LDT2-028K	3	295-305	5,5±0,2	298,37	55,15	140±3	0,08
LDT2-028K	4	295-305	10,0±0,3	297,95	48,68	143±3	0,10

Tabulka A 2 Stabilita maximálního výkonu prvku DT1-028KL v oblasti f_r ± 0,5 Hz

Amplituda síly [N _{rms}]	Frekvenční rozsah [Hz]	P _{konst} [nW]	f _r ± 0,5 Hz		↓ frekvence		↑ frekvence	
			P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]
4	205-235	2,80	2,77	98,91	1,39	99,10	1,38	98,72
4	215-223	2,79	2,71	97,34	1,37	98,52	1,34	96,16
4	235-265	3,71	3,65	98,57	1,83	98,61	1,83	98,53
5	235-265	5,0	4,9	98,51	2,5	98,80	2,5	98,22

Tabulka A 3 Stabilita maximálního výkonu prvku DT1-028KL v oblasti $f_r \pm 1$ Hz

Amplituda síly [N_{rms}]	Frekvenční rozsah [Hz]	P_{konst} [nW]	$f_r \pm 0,5$ Hz		↓frekvence		↑frekvence	
			P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]
4	205-235	5,60	5,38	96,05	2,72	97,10	2,66	95,00
4	215-223	5,58	5,19	93,04	2,69	96,48	2,50	89,60
4	235-265	7,41	7,03	94,84	3,53	95,22	3,50	94,46
5	235-265	10,0	9,4	94,52	4,8	96,13	4,63	92,90

Tabulka A 4 Stabilita maximálního výkonu prvku DT1-052K v oblasti $f_r \pm 0,5$ Hz

Amplituda síly [N_{rms}]	Frekvenční rozsah [Hz]	P_{konst} [nW]	$f_r \pm 0,5$ Hz		↓frekvence		↑frekvence	
			P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]
3	287-303	4,9	4,7	97,09	2,4	97,26	2,4	96,92
4	287-303	6,0	5,8	97,10	2,9	97,51	2,9	96,70
5	289-301	8,9	8,7	97,66	4,3	97,30	4,4	98,01

Tabulka A 5 Stabilita maximálního výkonu prvku DT1-052K v oblasti $f_r \pm 1$ Hz

Amplituda síly [N_{rms}]	Frekvenční rozsah [Hz]	P_{konst} [nW]	$f_r \pm 0,5$ Hz		↓frekvence		↑frekvence	
			P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]
3	287-303	9,8	8,8	89,94	4,4	90,86	4,4	89,02
4	287-303	11,9	10,7	89,97	5,5	91,78	5,2	88,16
5	289-301	17,8	16,3	91,82	8,1	90,85	8,3	92,80

Tabulka A 6 Stabilita maximálního výkonu prvku DT2-028K v oblasti $f_r \pm 0,5$ Hz

Amplituda síly [N_{rms}]	Frekvenční rozsah [Hz]	P_{konst} [nW]	$f_r \pm 0,5$ Hz		↓frekvence		↑frekvence	
			P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]
2	291-300	1,37	1,32	96,46	0,66	96,91	0,66	96,02
3	291-300	2,4	2,4	97,46	1,2	97,37	1,2	97,55
3	294-300	2,4	2,4	97,19	1,2	97,36	1,2	97,01

Tabulka A 7 Stabilita maximálního výkonu prvku DT2-028K v oblasti $f_r \pm 1$ Hz

Amplituda síly [N_{rms}]	Frekvenční rozsah [Hz]	P_{konst} [nW]	$f_r \pm 0,5$ Hz		↓frekvence		↑frekvence	
			P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]
2	291-300	2,74	2,41	87,92	1,23	89,82	1,18	86,02
3	291-300	4,8	4,4	91,12	2,2	91,32	2,2	90,93
3	294-300	4,8	4,4	90,28	2,2	91,18	2,2	89,38

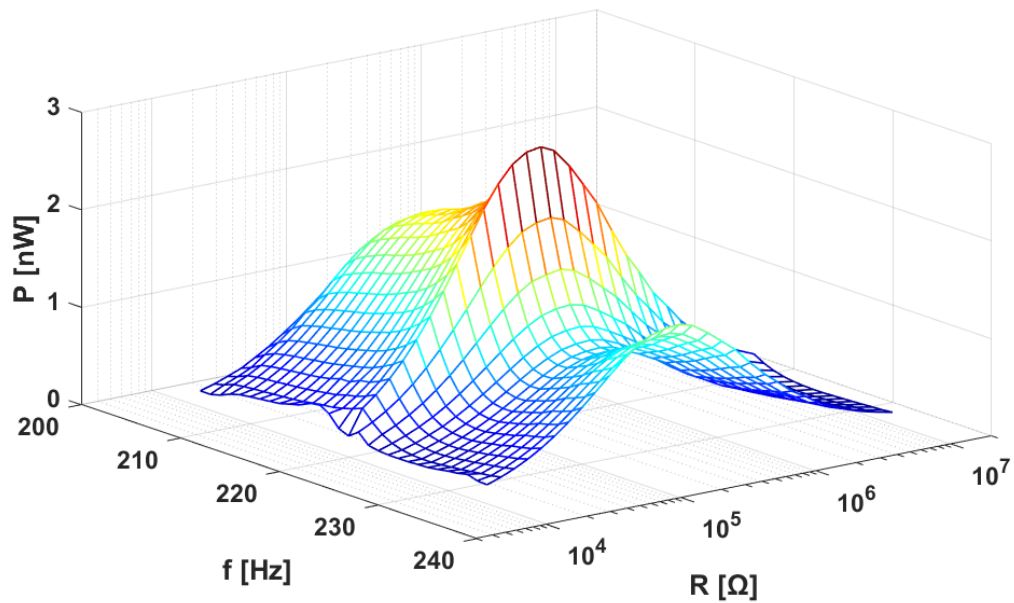
Tabulka A 8 Stabilita maximálního výkonu prvku LDT2-028K v oblasti $f_r \pm 0,5$ Hz

Amplituda síly [N_{rms}]	Frekvenční rozsah [Hz]	P_{konst} [nW]	$f_r \pm 0,5$ Hz		↓frekvence		↑frekvence	
			P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]
4	285-309	9,8	9,6	98,30	4,8	98,19	4,8	98,42
3	295-305	5,5	5,4	98,07	2,7	98,25	2,7	97,89
4	295-305	10,0	9,7	96,98	4,8	97,02	4,8	96,95

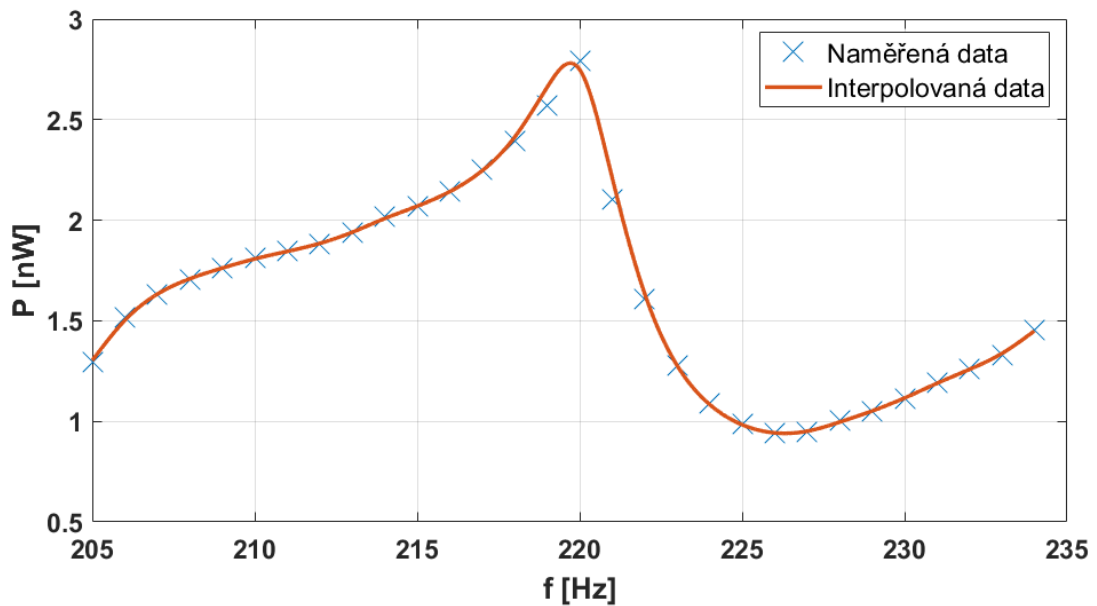
Tabulka A 9 Stabilita maximálního výkonu prvku LDT2-028K v oblasti $f_r \pm 1$ Hz

Amplituda síly [N_{rms}]	Frekvenční rozsah [Hz]	P_{konst} [nW]	$f_r \pm 0,5$ Hz		↓frekvence		↑frekvence	
			P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]	P [nW]	δ [%]
4	285-309	19,6	18,4	93,97	9,1	93,54	9,2	94,40
3	295-305	10,9	10,2	93,23	5,1	93,46	5,1	93,00
4	295-305	19,9	18,3	91,53	9,1	91,26	9,2	91,80

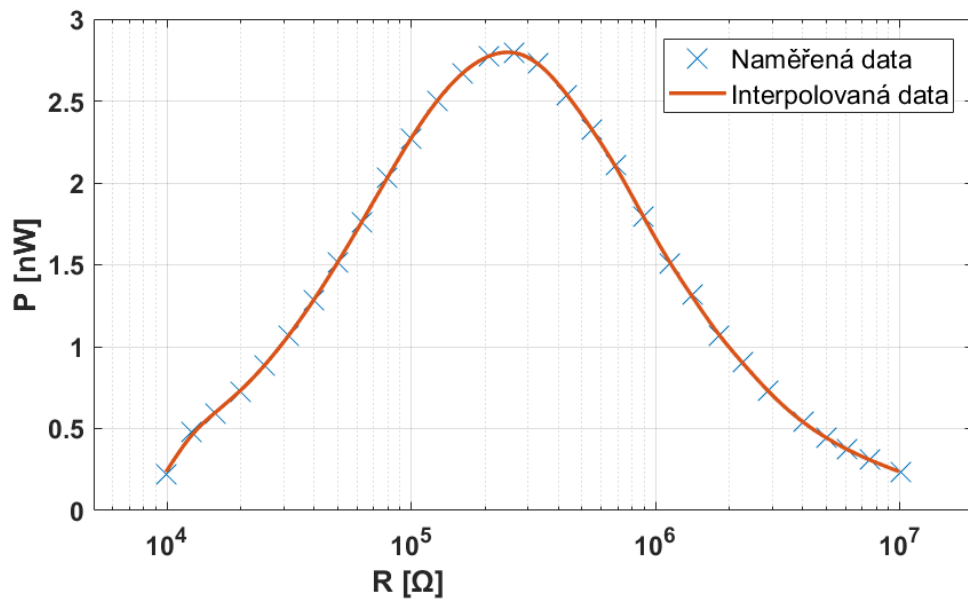
B. Naměřené průběhy



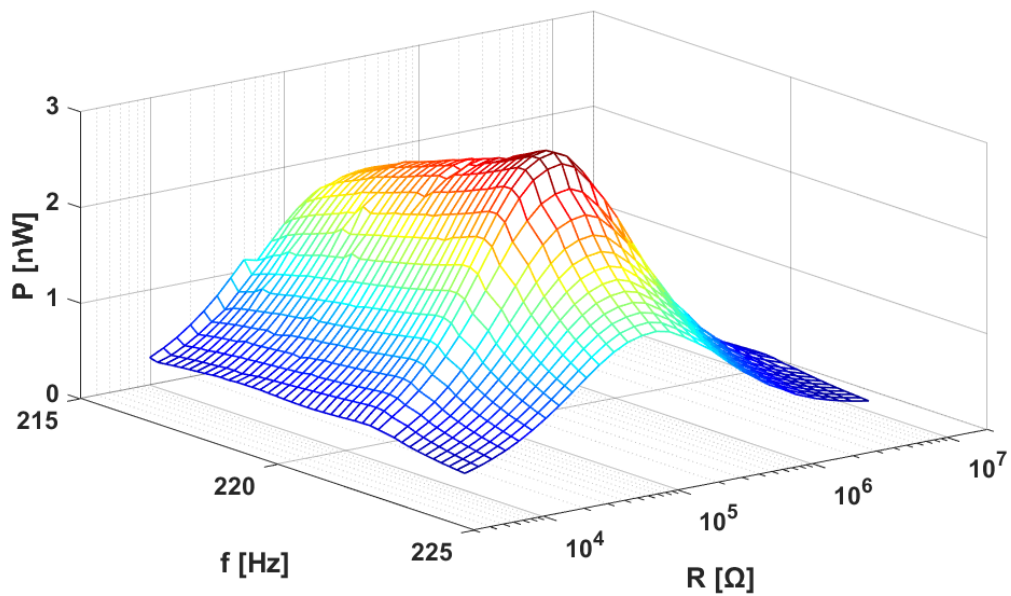
Obrázek B 1 Výkon prvku DT1-028K/L v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=4 N_{rms}$, $f = 205-235$ Hz



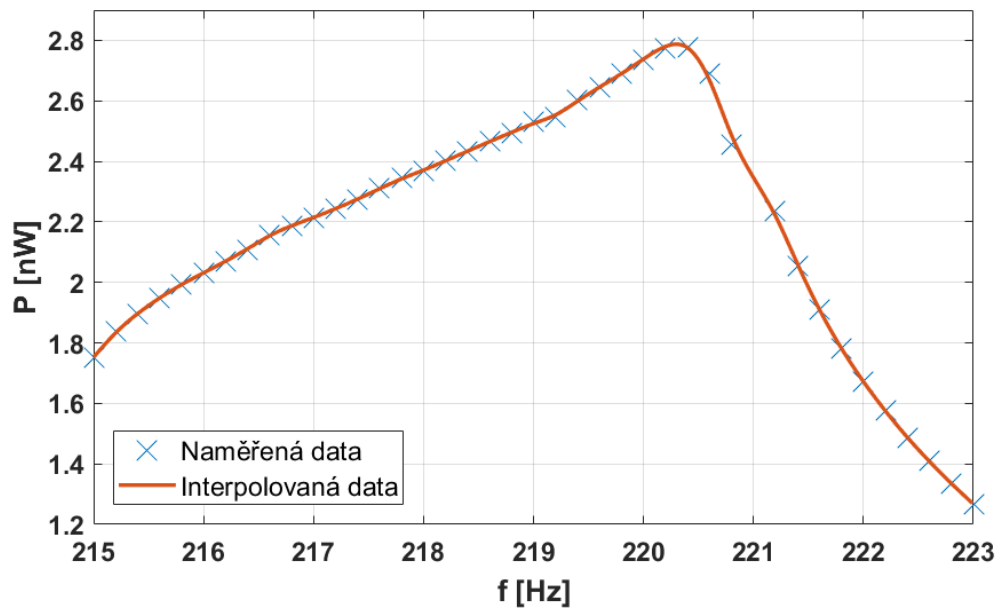
Obrázek B 2 Závislost výkonu prvku DT1-028K/L na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=4 N_{rms}$, $f = 205-235$ Hz



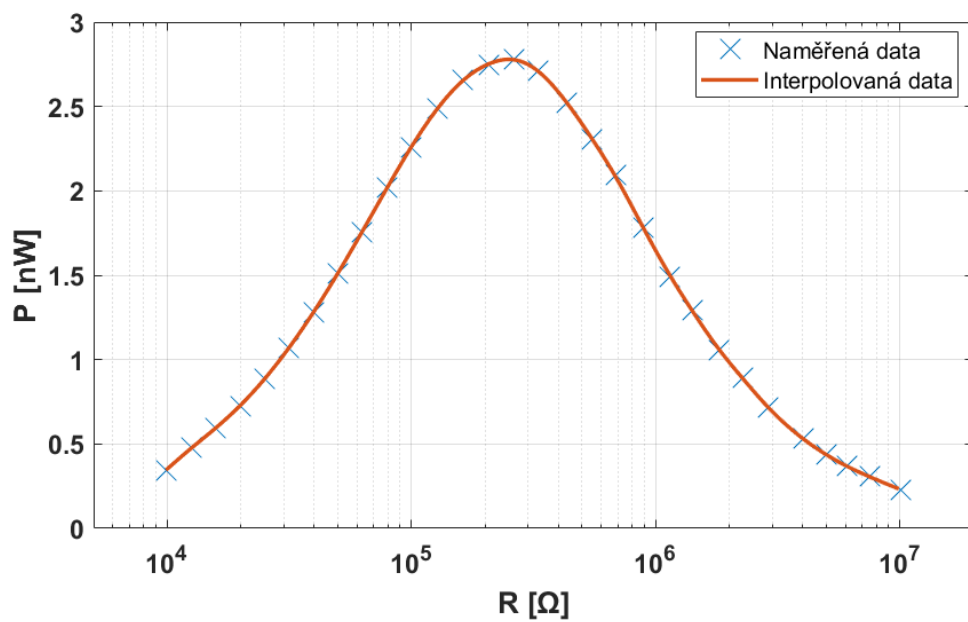
Obrázek B 3 Závislost výkonu prvku DT1-028K/L na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=4 N_{rms}$, $f = 205-235$ Hz



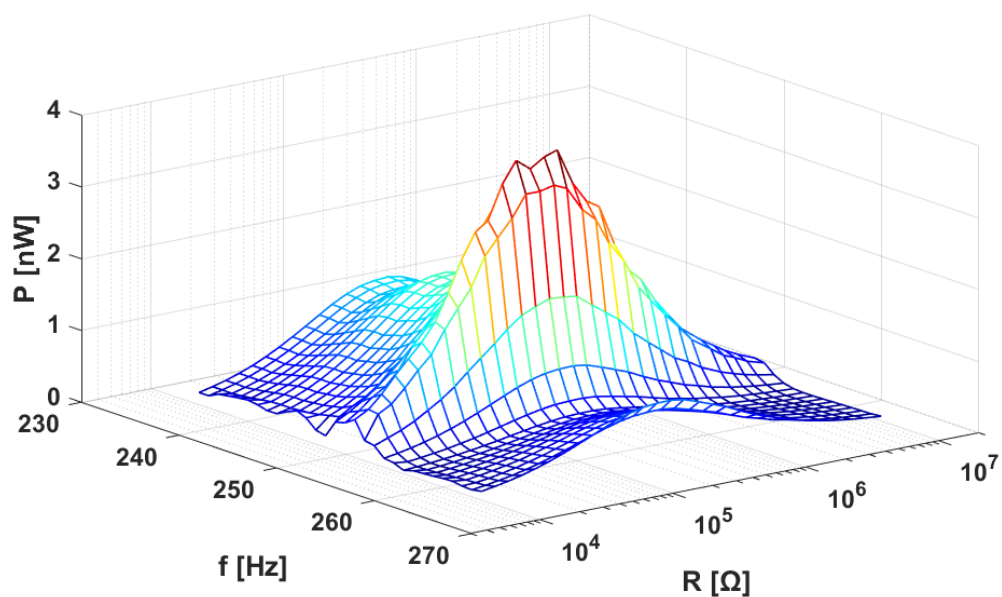
Obrázek B 4 Výkon prvku DT1-028K/L v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=4 N_{rms}$, $f = 215-223$ Hz



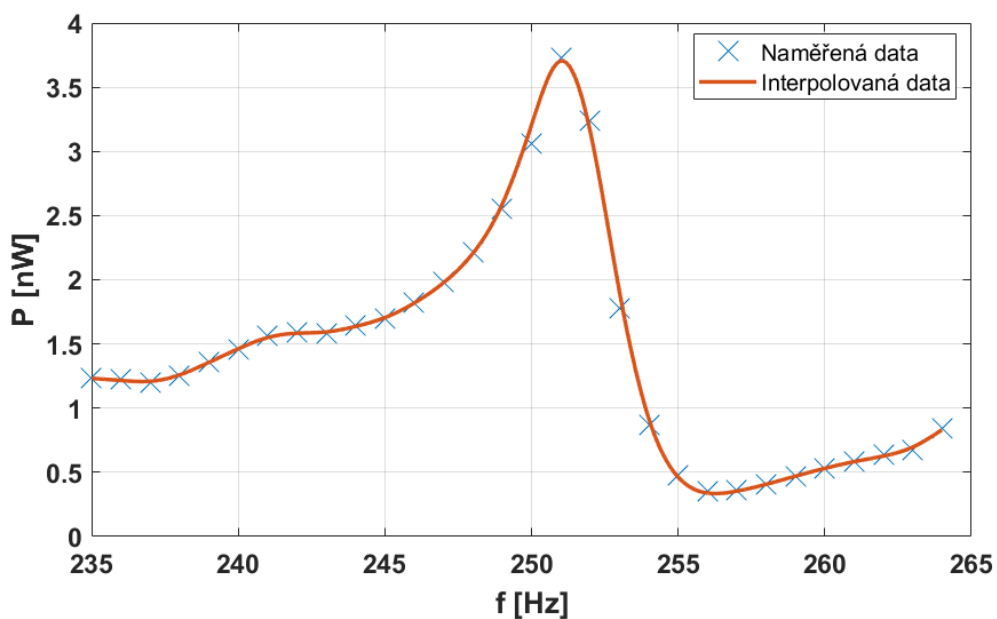
Obrázek B 5 Závislost výkonu prvku DT1-028K/L na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=4 N_{rms}$, $f = 215-223$ Hz



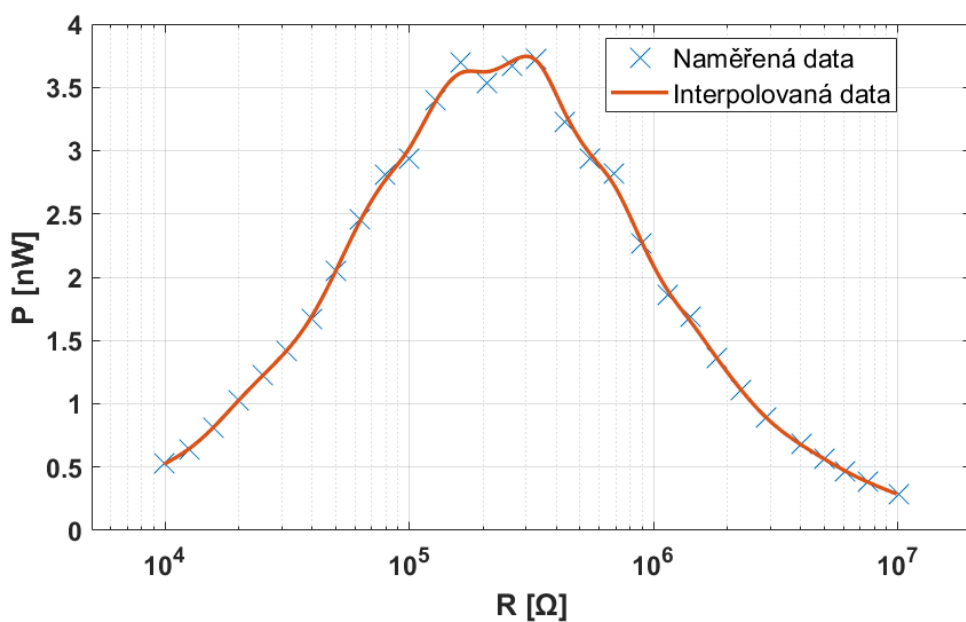
Obrázek B 6 Závislost výkonu prvku DT1-028K/L na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=4 N_{rms}$, $f = 215-223$ Hz



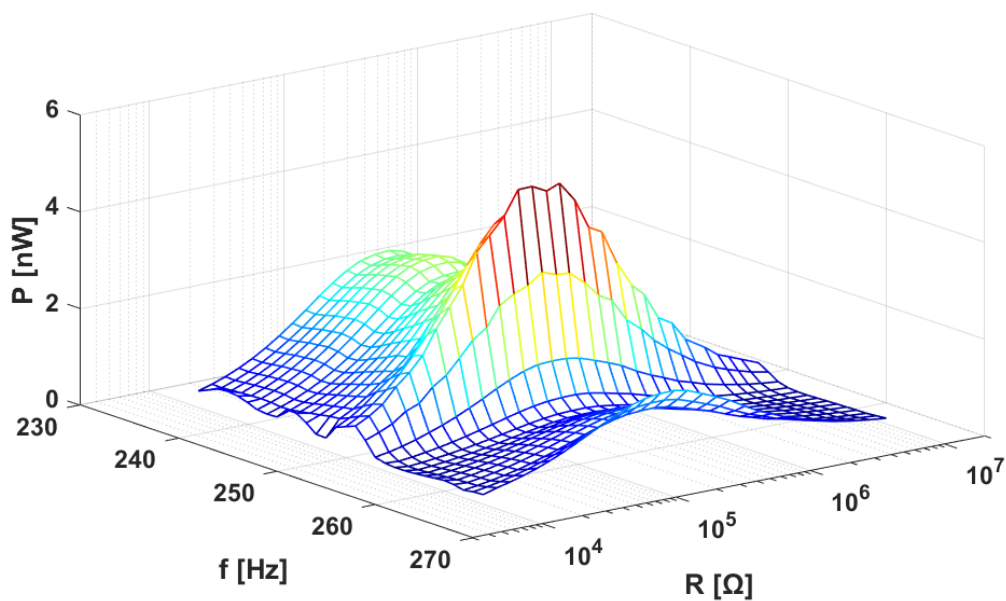
Obrázek B 7 Výkon prvku DT1-028K/L v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=4 N_{rms}$, $f = 235-265$ Hz



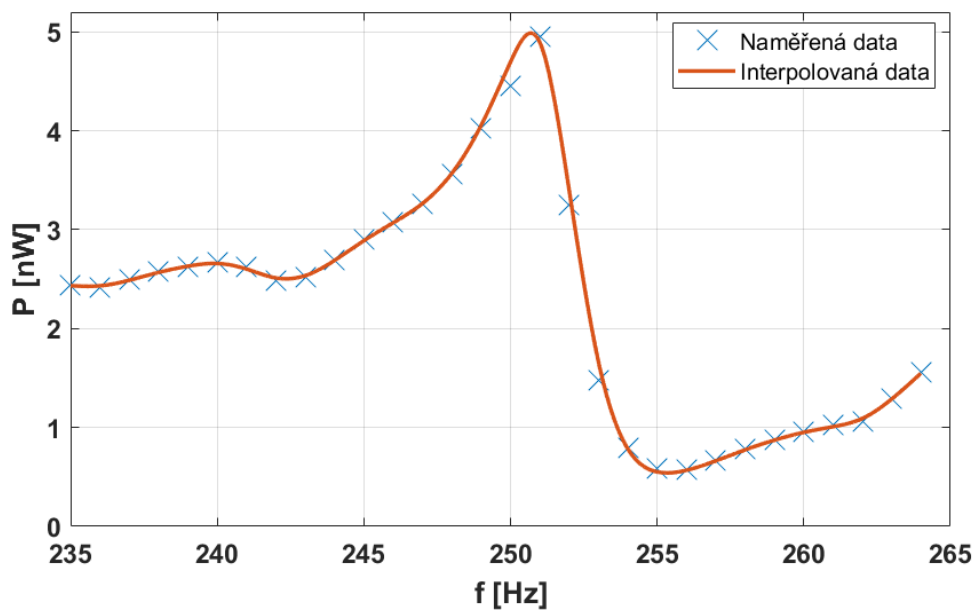
Obrázek B 8 Závislost výkonu prvku DT1-028K/L na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=4 N_{rms}$, $f = 235-265$ Hz



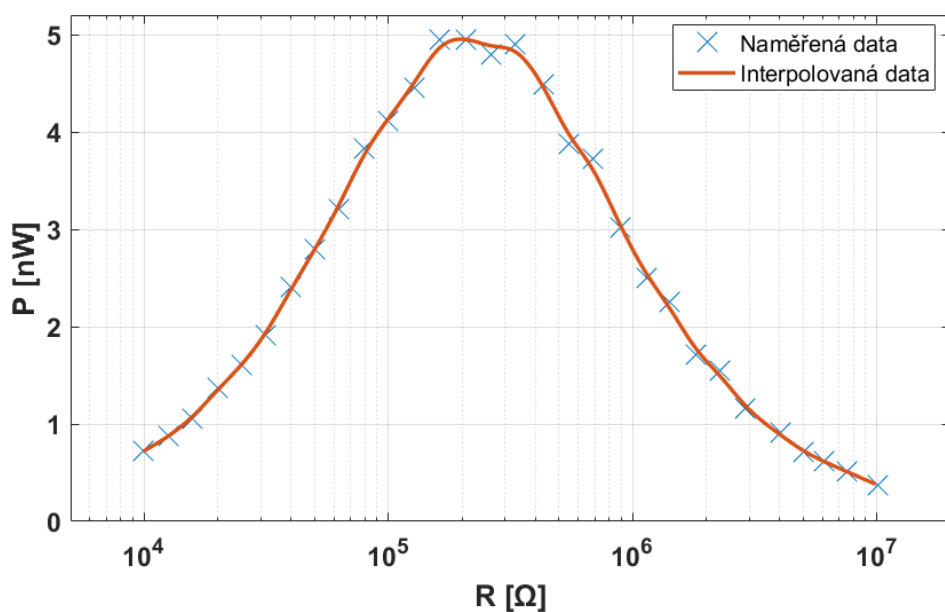
Obrázek B 9 Závislost výkonu prvku DT1-028K/L na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=4 N_{rms}$, $f = 235-265$ Hz



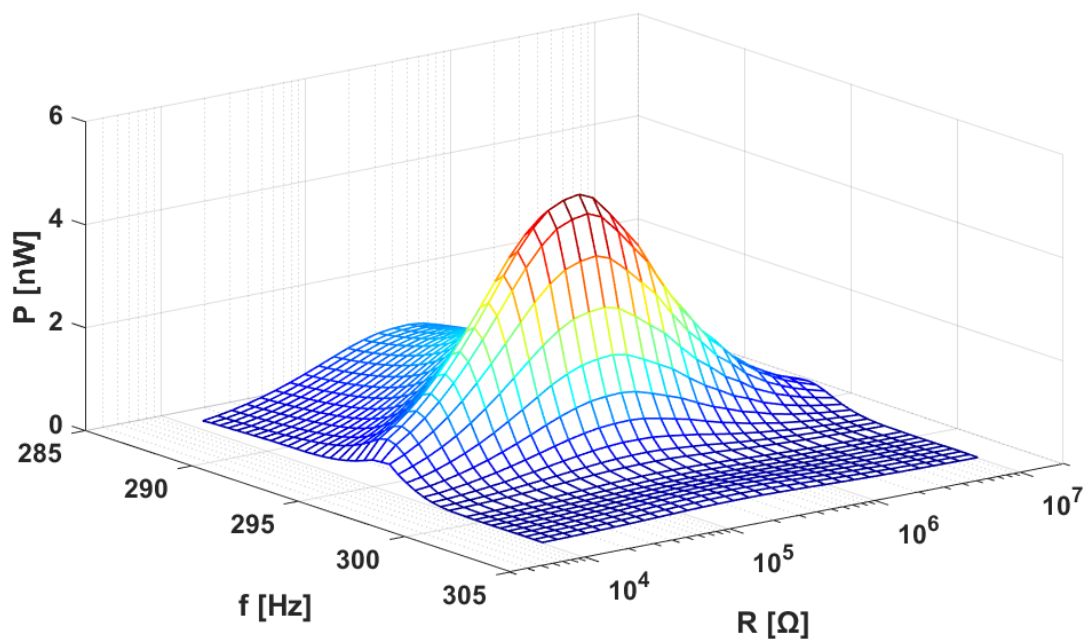
Obrázek B 10 Výkon prvku DT1-028K/L v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=5 N_{rms}$, $f = 235-265$ Hz



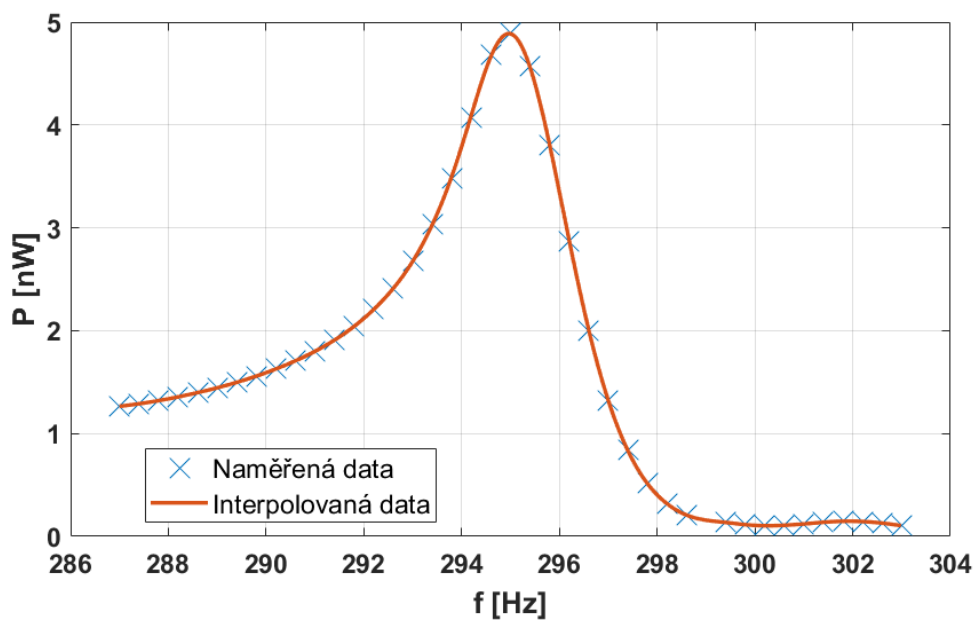
Obrázek B 11 Závislost výkonu prvku DT1-028K/L na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=5 N_{rms}$, $f = 235-265$ Hz



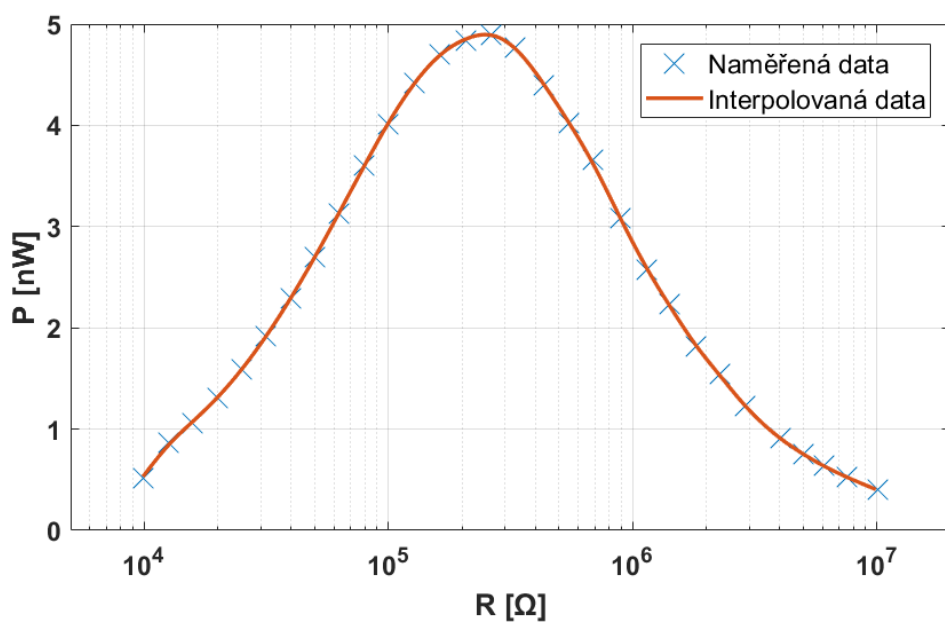
Obrázek B 12 Závislost výkonu prvku DT1-028K/L na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=5 N_{rms}$, $f = 235-265$ Hz



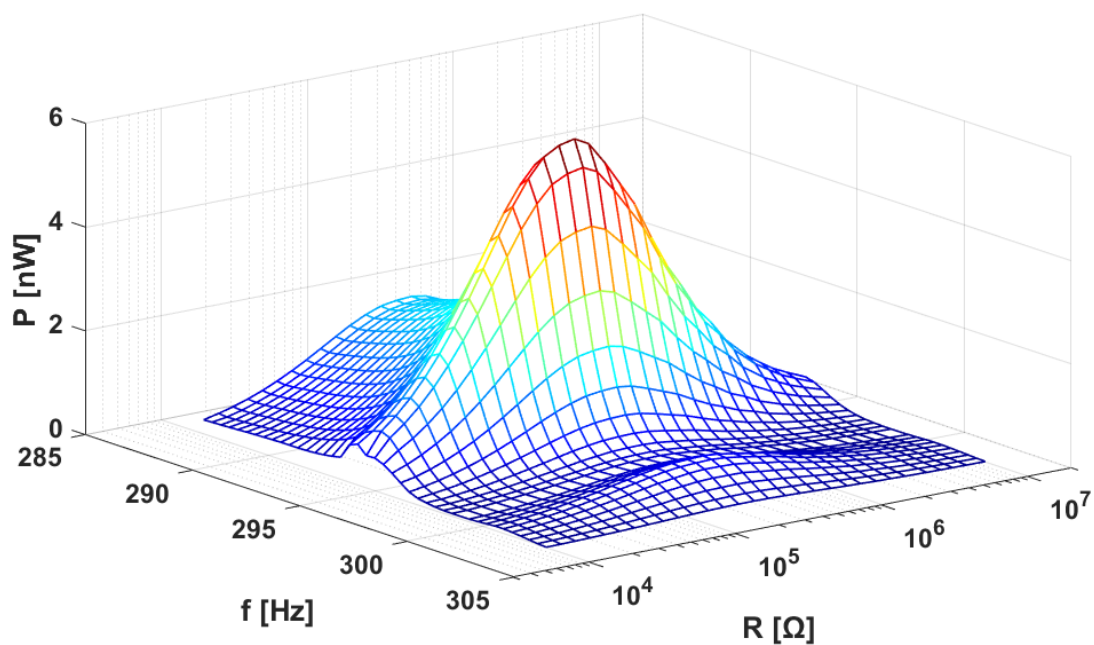
Obrázek B 13 Výkon prvku DT1-052K v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=3 N_{rms}$, $f = 287-303$ Hz



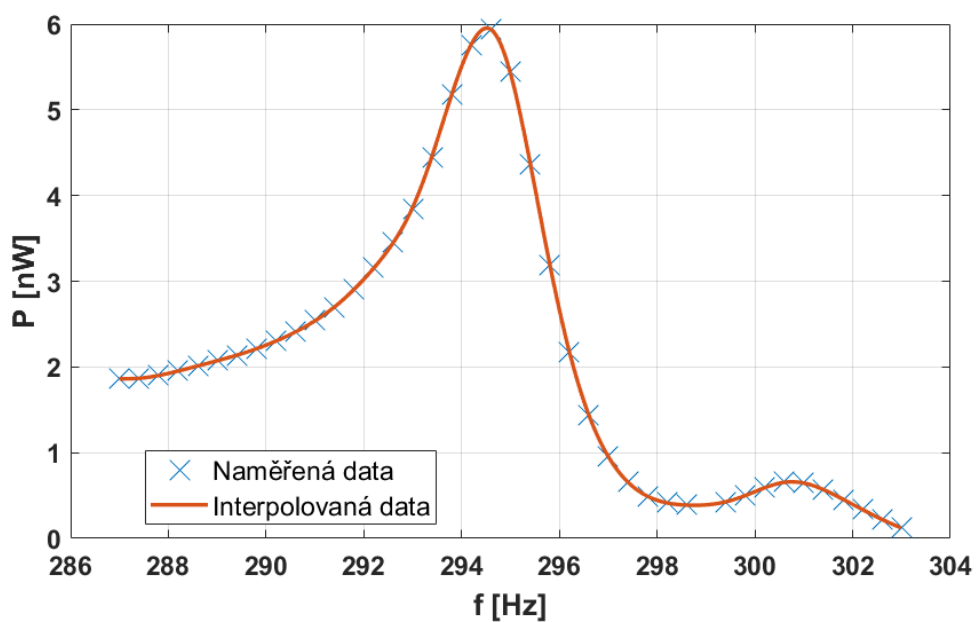
Obrázek B 14 Závislost výkonu prvku DT1-052K na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=3 N_{rms}$, $f = 287-303$ Hz



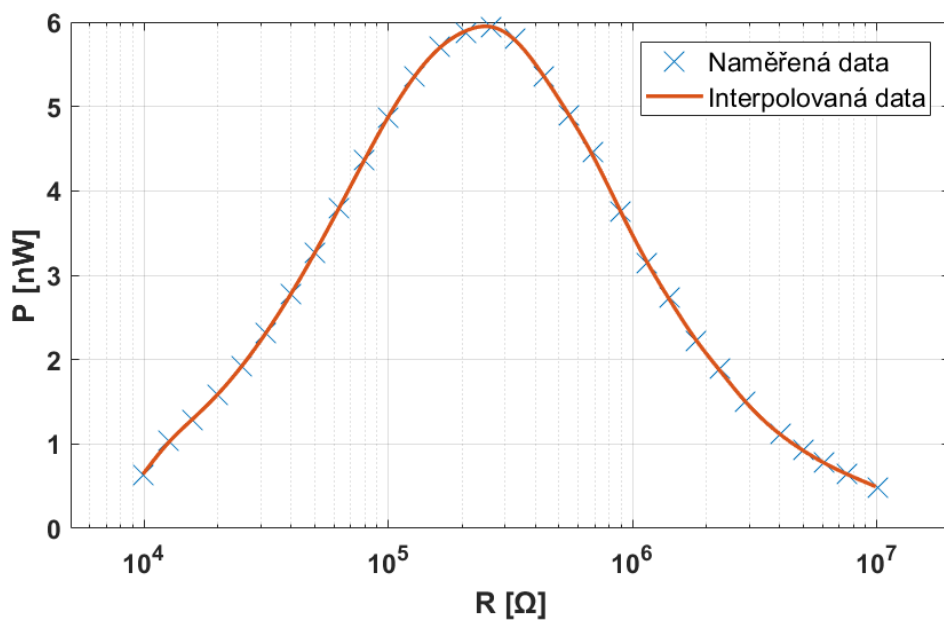
Obrázek B 15 Závislost výkonu prvku DT1-052K na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=3 N_{rms}$, $f = 287-303$ Hz



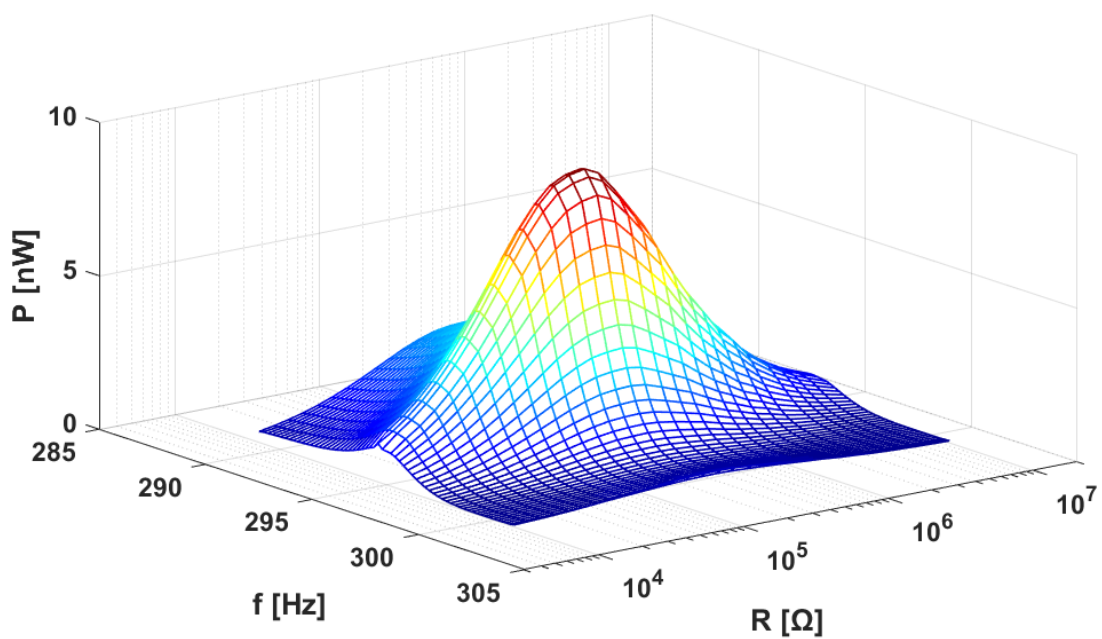
Obrázek B 16 Výkon prvku DT1-052K v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=4 N_{rms}$, $f = 287-303$ Hz



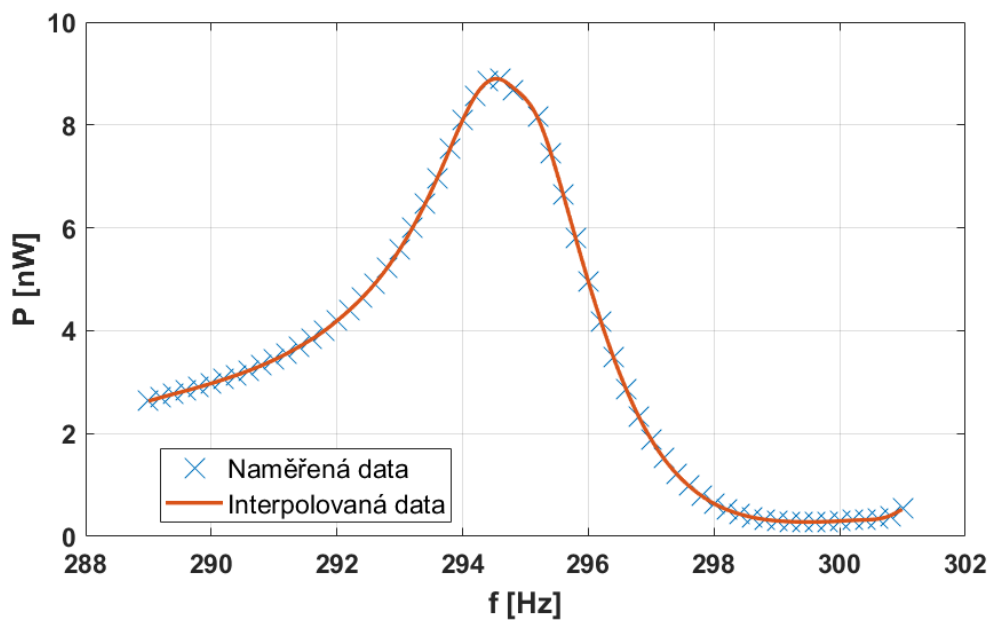
Obrázek B 17 Závislost výkonu prvku DT1-052K na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=4 N_{rms}$, $f = 287-303$ Hz



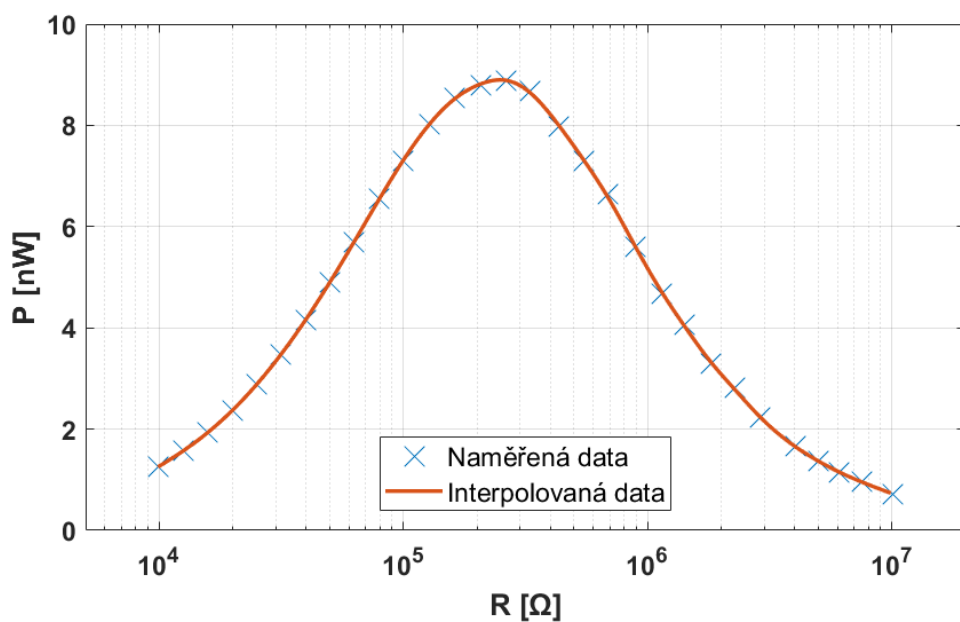
Obrázek B 18 Závislost výkonu prvku DT1-052K na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=4 N_{rms}$, $f = 287-303$ Hz



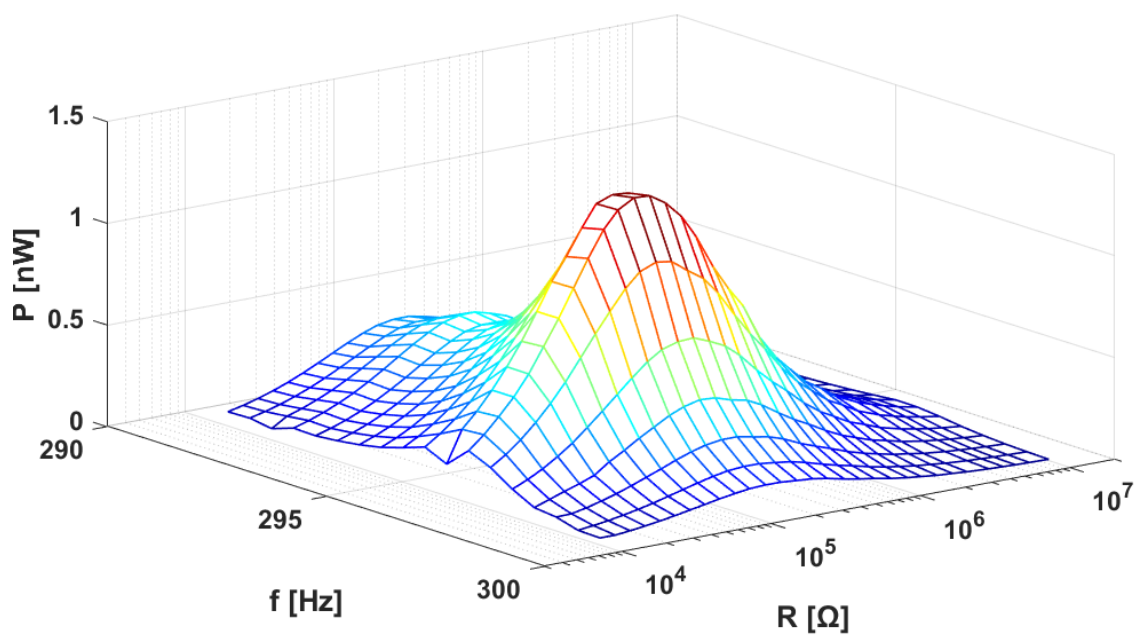
Obrázek B 19 Výkon prvku DT1-052K v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=5 N_{rms}$, $f = 289-301$ Hz



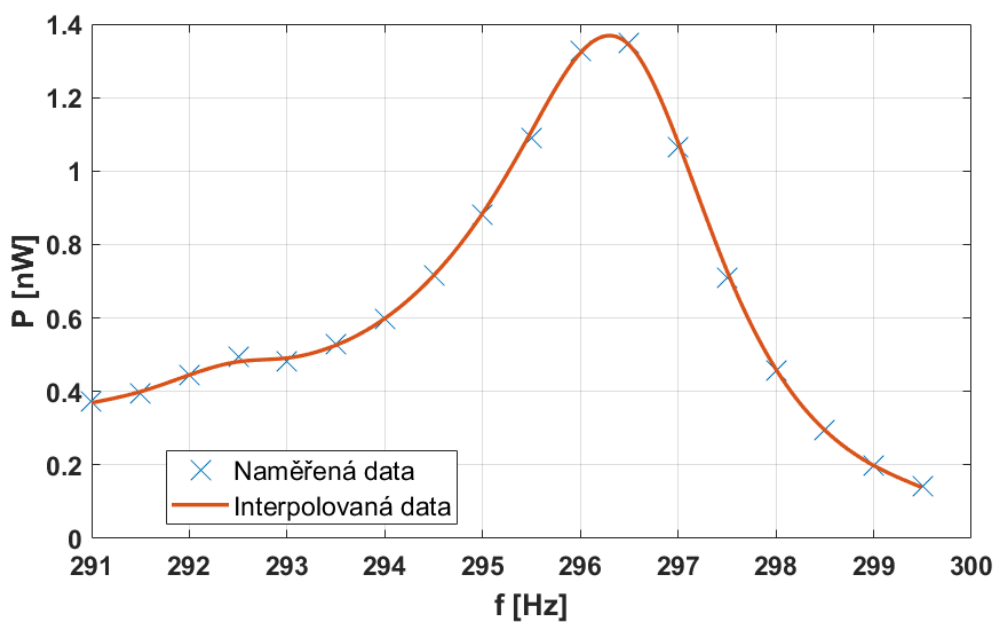
Obrázek B 20 Závislost výkonu prvku DT1-052K na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=5 N_{rms}$, $f = 289-301$ Hz



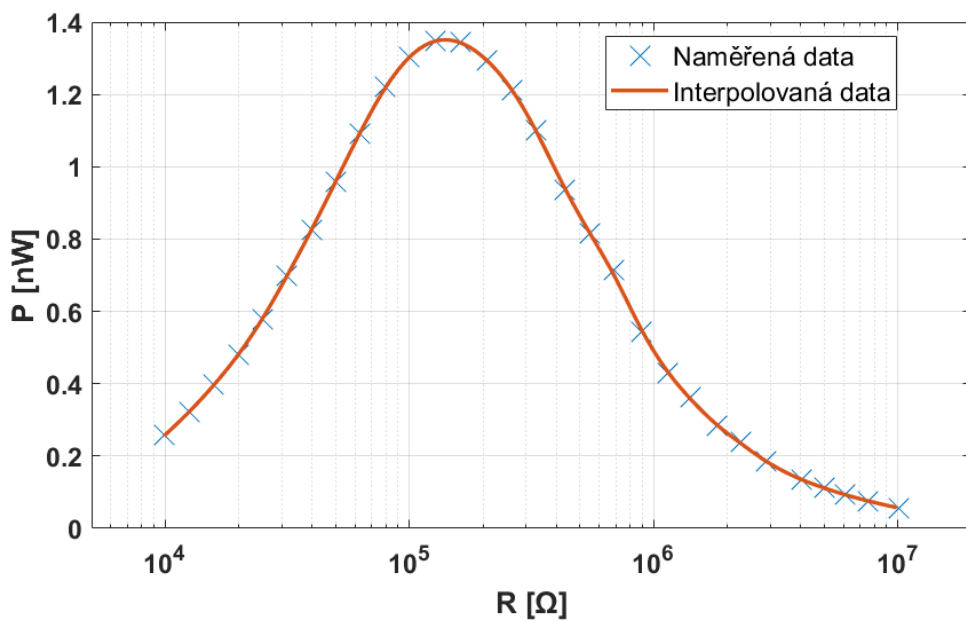
Obrázek B 21 Závislost výkonu prvku DT1-052K na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=5 N_{rms}$, $f = 289-301$ Hz



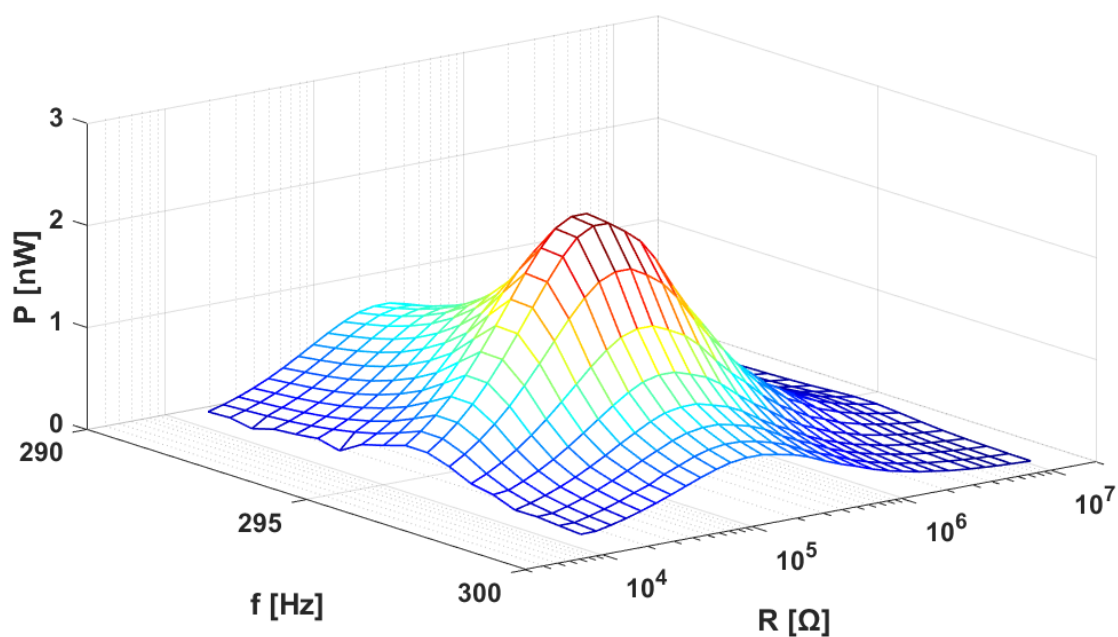
Obrázek B 22 Výkon prvku DT2-028K v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=2 N_{rms}$, $f = 291-300$ Hz



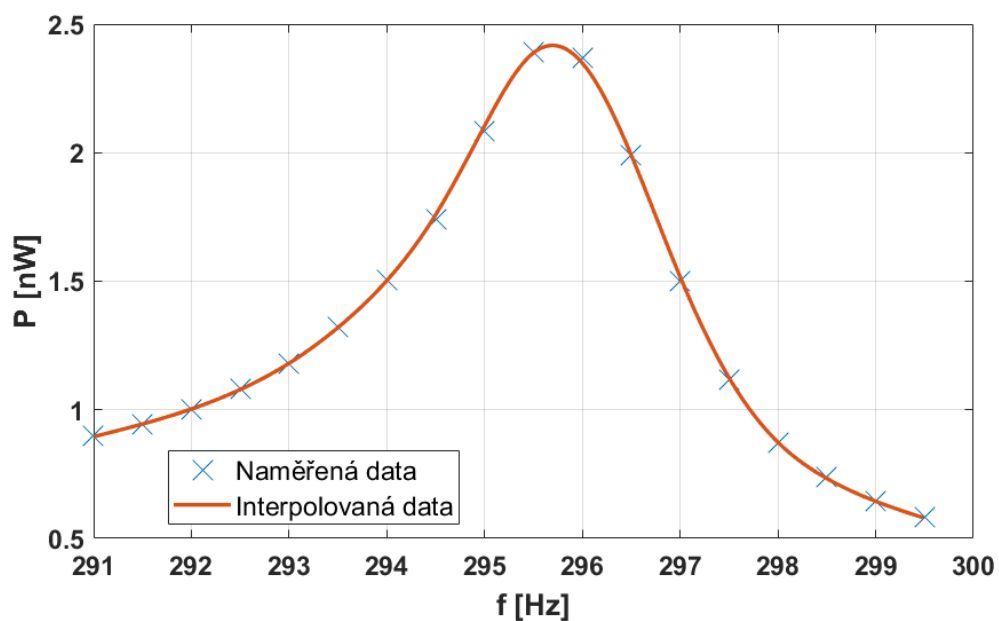
Obrázek B 23 Závislost výkonu prvku DT2-028K na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=2 N_{rms}$, $f = 291-300$ Hz



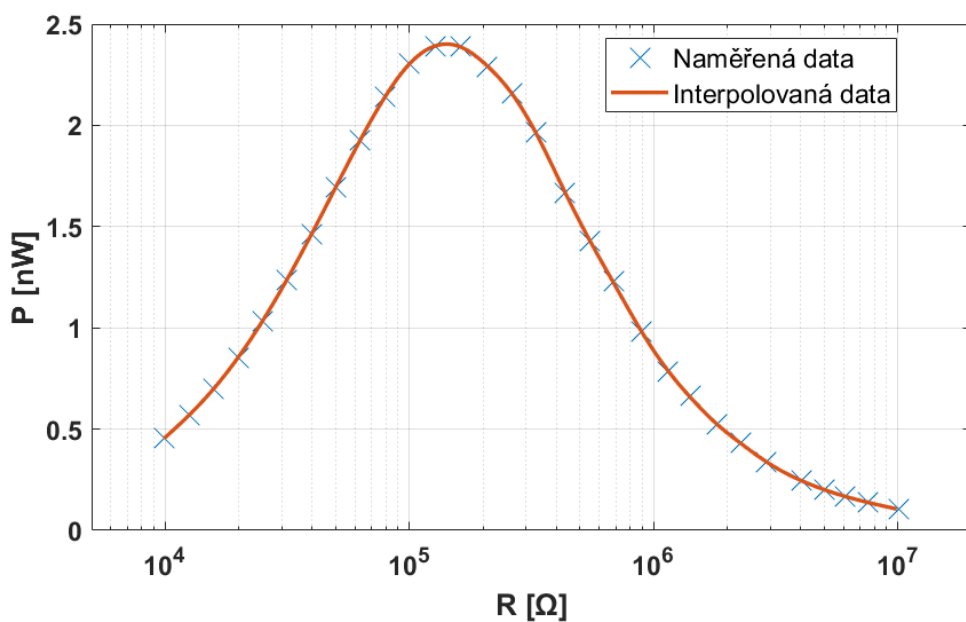
Obrázek B 24 Závislost výkonu prvku DT2-028K na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=2 N_{rms}$, $f = 291-300$ Hz



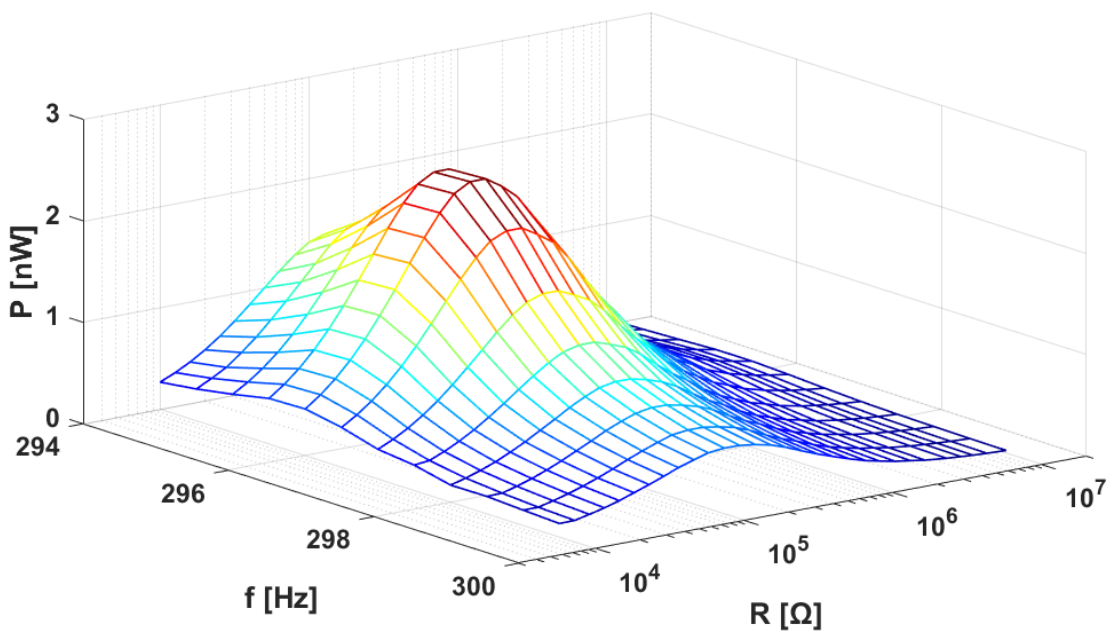
Obrázek B 25 Výkon prvku DT2-028K v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=3 N_{rms}$, $f = 291-300$ Hz



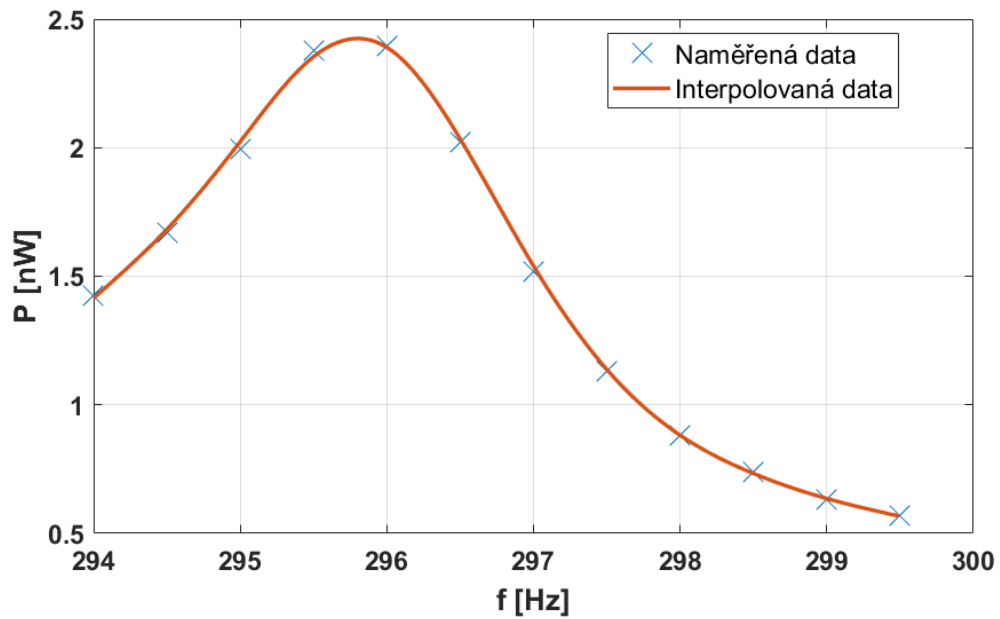
Obrázek B 26 Závislost výkonu prvku DT2-028K na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=3 N_{rms}$, $f = 291-300$ Hz



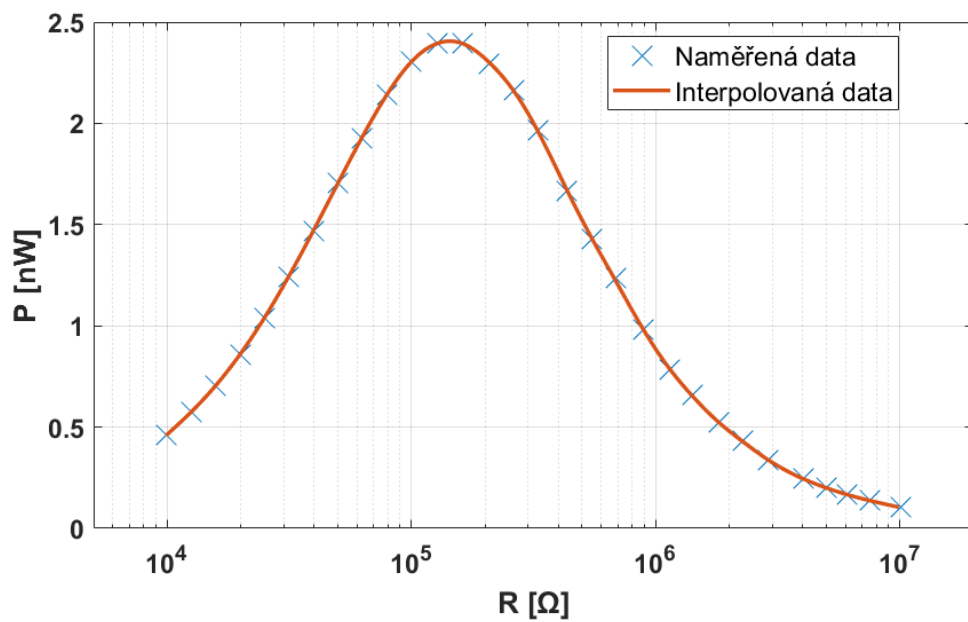
Obrázek B 27 Závislost výkonu prvku DT2-028K na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=3 N_{rms}$, $f = 291-300$ Hz



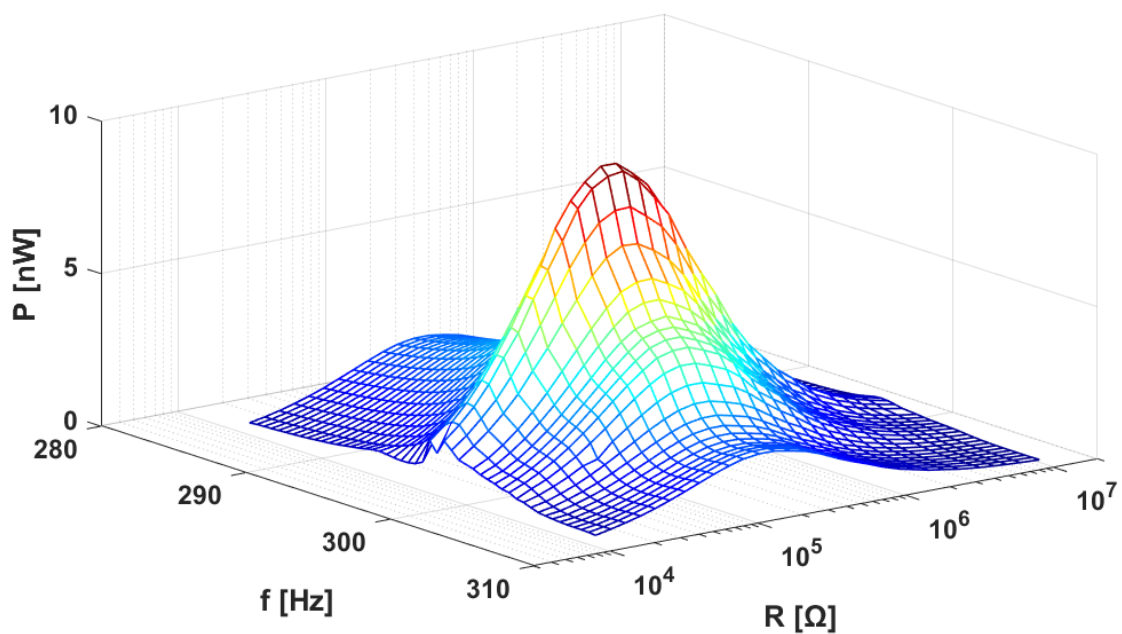
Obrázek B 28 Výkon prvku DT2-028K v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=3 N_{rms}$, $f = 294-300$ Hz



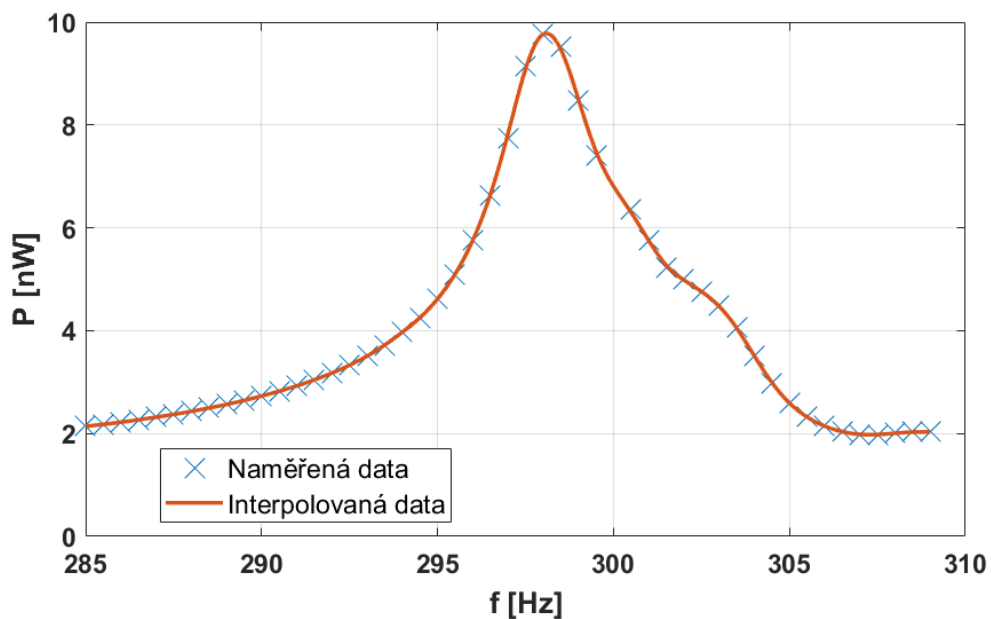
Obrázek B 29 Závislost výkonu prvku DT2-028K na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=3 N_{rms}$, $f = 294-300$ Hz



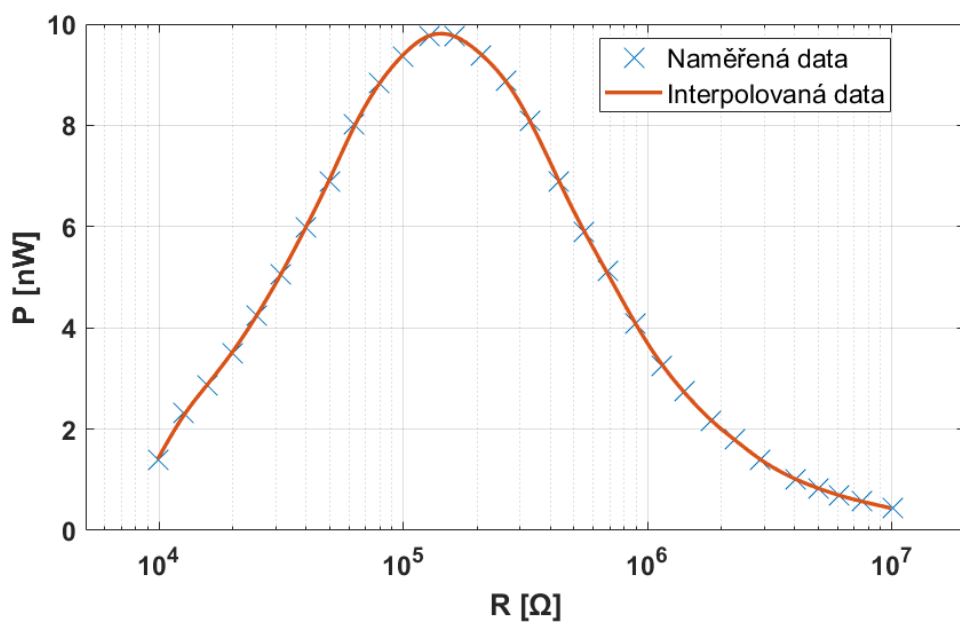
Obrázek B 30 Závislost výkonu prvku DT2-028K na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=3 N_{rms}$, $f = 294-300$ Hz



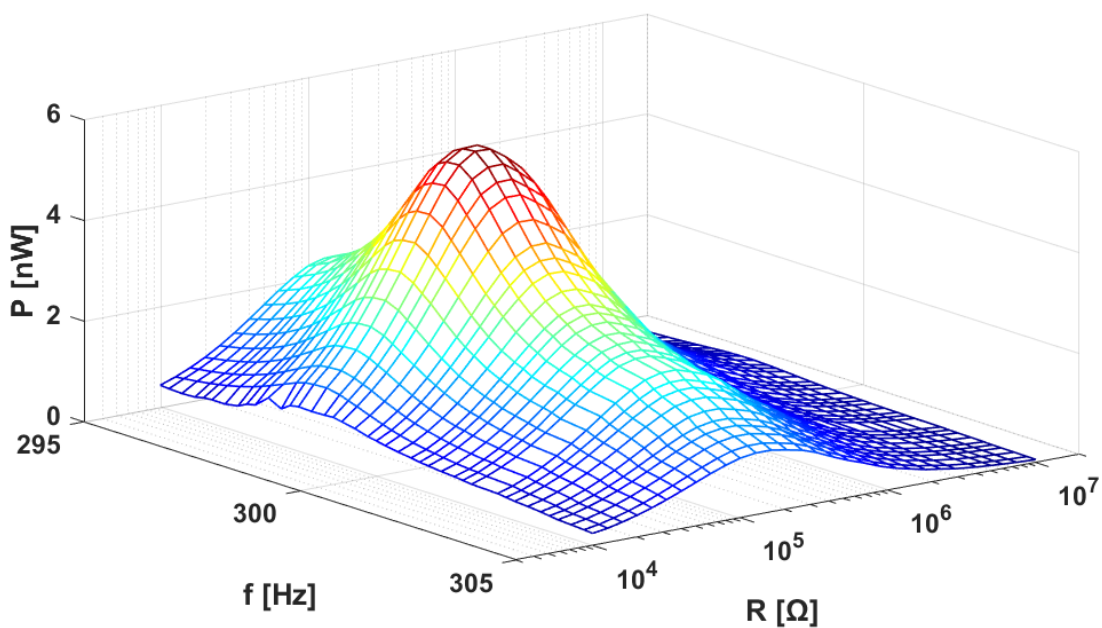
Obrázek B 31 Výkon prvku LDT2-028K v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=4 N_{rms}$, $f = 285-309$ Hz



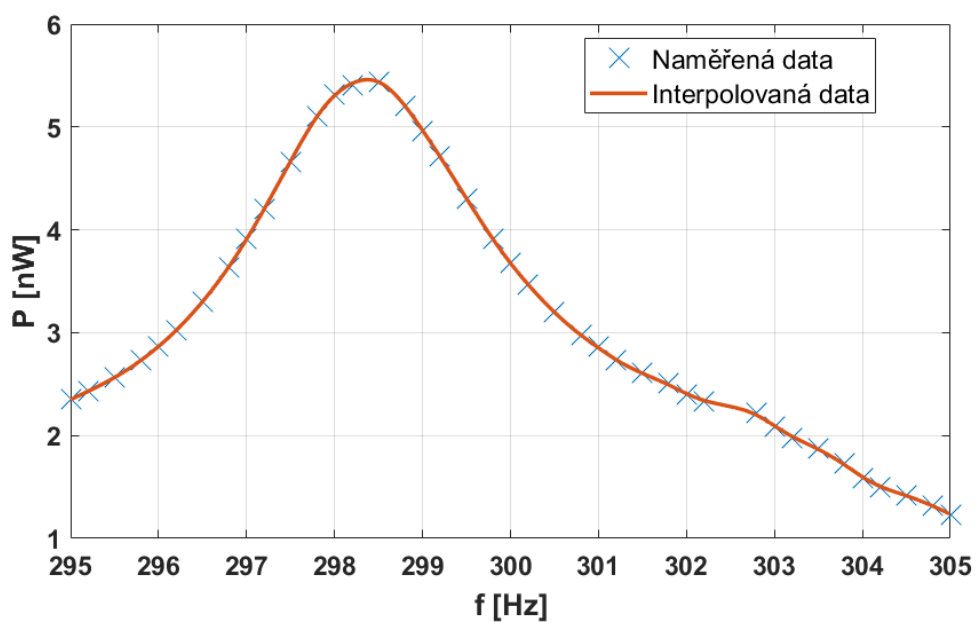
Obrázek B 32 Závislost výkonu prvku LDT2-028K na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=4 N_{rms}$, $f = 285-309$ Hz



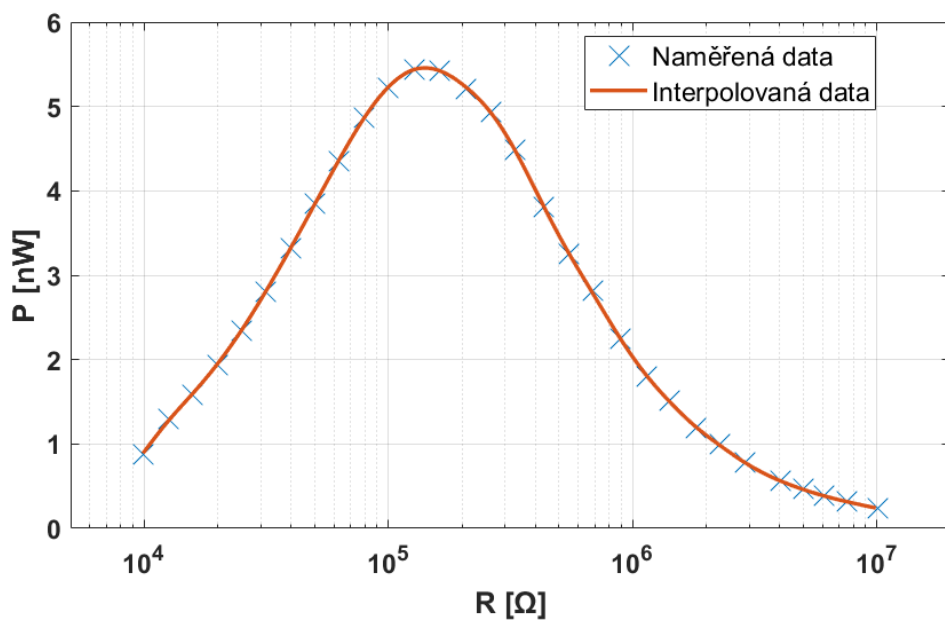
Obrázek B 33 Závislost výkonu prvku LDT2-028K na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=4 N_{rms}$, $f = 285-309$ Hz



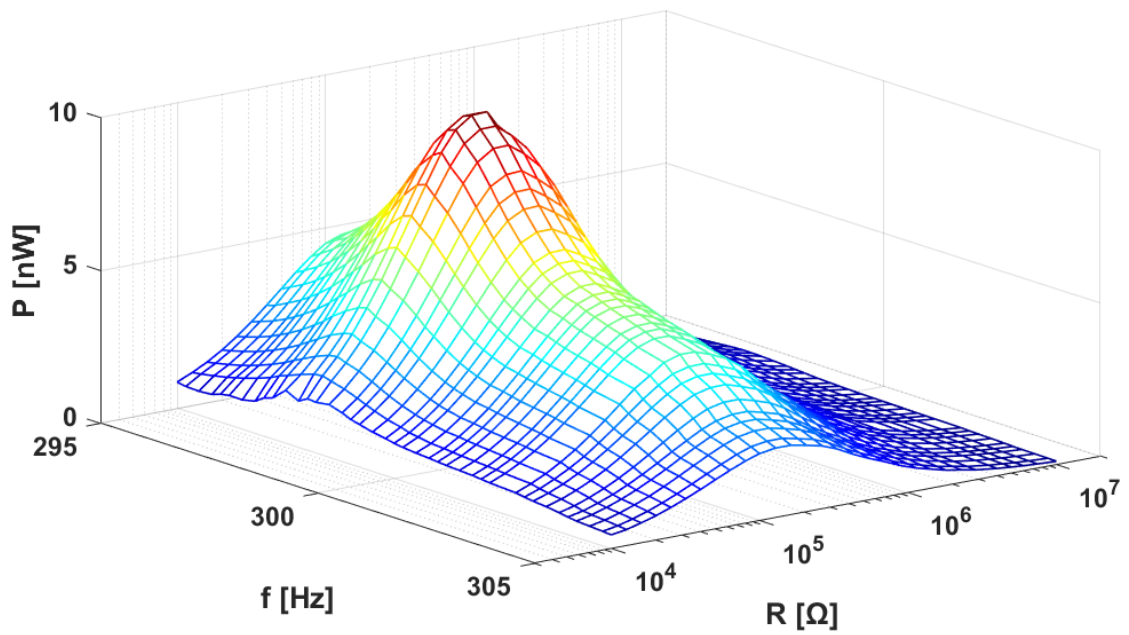
Obrázek B 34 Výkon prvku LDT2-028K v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=3 N_{rms}$, $f = 295-305$ Hz



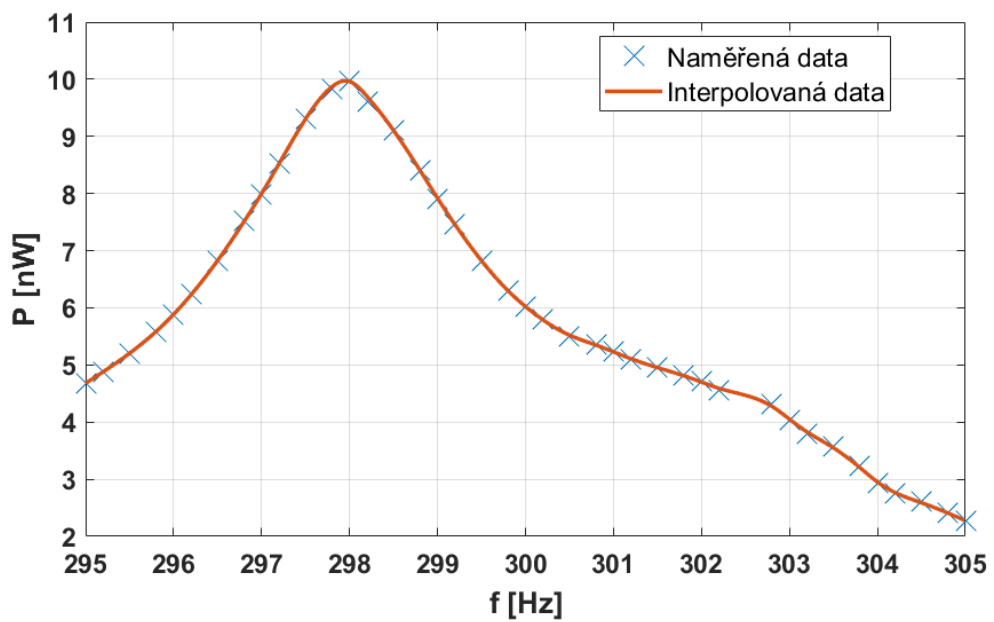
Obrázek B 35 Závislost výkonu prvku LDT2-028K na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=3 N_{rms}$, $f = 295-305$ Hz



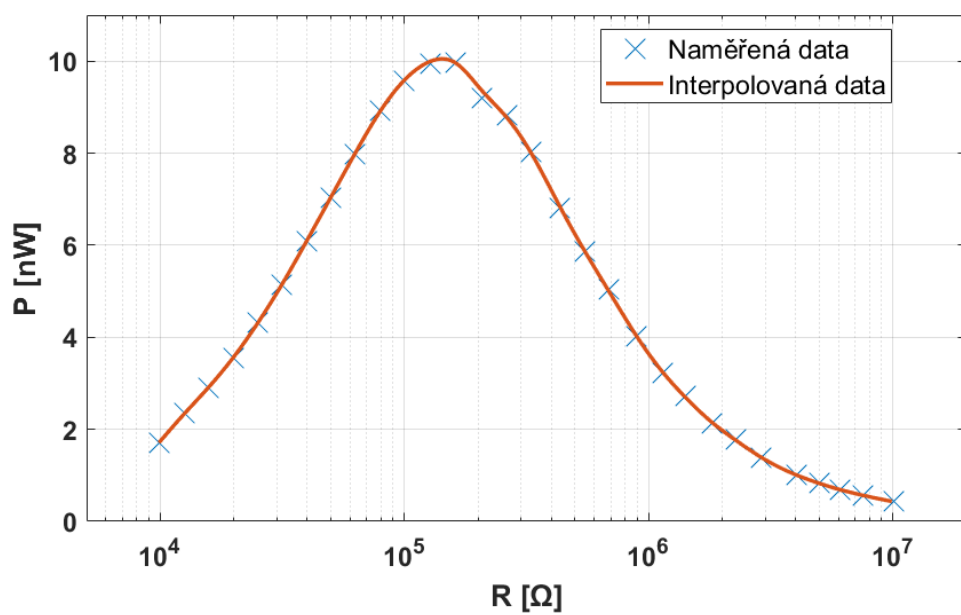
Obrázek B 36 Závislost výkonu prvku LDT2-028K na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=3 N_{rms}$, $f = 295-305$ Hz



Obrázek B 37 Výkon prvku LDT2-028K v závislosti na frekvenci a odporovém zatížení, $A=4 N_{rms}$, $f = 295-305$ Hz



Obrázek B 38 Závislost výkonu prvku LDT2-028K na frekvenci při optimálním odporovém zatížení, $A=4 N_{rms}$, $f = 295-305$ Hz



Obrázek B 39 Závislost výkonu prvku LDT2-028K na odporovém zatížení při rezonanční frekvenci, $A=4 N_{rms}$, $f = 295-305$ Hz

C. CD

Obsah CD:

- BP2020_Kasperek.pdf
- BP2020_Kasperek_P1_ProgramZpracovaniDat
- BP2020_Kasperek_P2_ProgramMereniImpulzu
- BP2020_Kasperek_P3_GrafyHarmonickeMereni
- BP2020_Kasperek_P4_GrafyImpulzniMereni

Pozn. Tato práce navazovala na předcházející práce zaměřené na měření výkonu piezoelektrických energy harvesterů, zejména na práci An Automated measurement system for measuring an overall power efficiency and a characterisation of piezo harvesters (autoři Kunz, J.; Fialka, J.; Beneš, P.; Havránek, Z.). Práce je k nalezení na <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1065/20/202008>.

Program pro měření s harmonickým zatížením byl převzat a mírně upraven, a proto není přiložen v přílohách.