



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**APLIKACE EVOLUČNÍHO ALGORITMU NA
OPTIMALIZAČNÍ ÚLOHU VIBRAČNÍHO GENERÁTORU**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Manh Thanh Nguyen

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Manh Thanh Nguyen
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aplikace evolučního algoritmu na optimalizační úlohu vibračního generátoru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Evolučního algoritmy jsou užitečný nástroj pro optimalizační úlohy multidisciplinárních systémů. Úkolem této práce je vytvořit simulační model vibračního generátoru, který generuje elektrickou energii z vibrací, a aplikovat metody evolučních algoritmů na optimalizační úlohu. Cílem je najít konstrukční a elektrické parametry generátorů elektrické energie pro maximalizaci generovaného výkonu při stávající velikosti a hmotnosti.

Cíle diplomové práce:

1. Rešerše optimalizačních metod pro úlohy s větším počtem optimalizovaných parametrů.
2. Vytvoření simulačních modelů generátorů elektrické energie.
3. Implementace optimalizačního algoritmu na dané modely.
4. Citlivostní analýza vybraných parametrů na generovaný výkon.
5. Návrh optimálních parametrů generátoru dle zadaných vstupních informací pro konkrétní aplikaci.

Seznam doporučené literatury:

HADAS, Zdenek, Jiri KURFURST, Cestmir ONDRUSEK a Vladislav SINGULE, 2012. Artificial intelligence based optimization for vibration energy harvesting applications. *Microsystem Technologies* [online]. 7.2., roč. 18, č. 7–8, s. 1003–1014 [vid. 12. září 2013]. ISSN 0946-7076.

GUO, Lei a Yi QIN, 2016. Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever. 2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, URAI 2016 [online]. s. 248–251. ISSN 0964-1726.

ERTURK, Alper, 2009. Electromechanical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters
Electromechanical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters. B.m. Virginia Polytechnic Institute
and State University.

BERBYUK, Viktor, 2011. Optimal Design of Magnetostrictive Transducers for Power Harvesting From
Vibrations. In: Proceedings of the IMAC-XXVIII, A Conference on Structural Dynamics, The Society of
Experimental Mechanics [online]. s. 199–200. ISBN 978-1-4419-9715-9.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se bude zabývat použitím metod umělé inteligence pro řešení optimalizační úlohy s více proměnnými. Rešeršní část je věnována problematice globální optimalizace a přehledu metod řešení. Z praktických důvodů je speciální pozornost věnována algoritmům evolučním. Předmětem optimalizace samotné je pak energy harvester využívající piezoelektrického jevu. Jeho podstatě a modelování je věnována samostatná kapitola. Součástí práce je implementace algoritmu SOMA pro návrh parametrů generátoru pro maximální výkon.

Abstract

This thesis will deal with the use of artificial intelligence methods for solving optimization problems with multiple variables. A theoretical part presents problems of global optimization and overview of solution methods. For practical reasons, special attention is paid to evolutionary algorithms. The subject of optimization itself is energy harvester based on a piezoelectric effect. Its nature and modeling is devoted to one chapter. A part of the thesis is the implementation of the SOMA algorithm for finding the optimal parameters of the generator for maximum performance.

Klíčová slova

globální optimalizace, evoluční algoritmy, SOMA, umělá inteligence, energy harvesting, piezoelektrický vibrační generátor

Keywords

global optimization, evolutionary algorithms, SOMA, artificial intelligence, energy harvesting, piezoelectric generator

NGUYEN, M. T. *Aplikace evolučního algoritmu na optimalizační úlohu vibračního generátoru..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 60 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D..

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Aplikace evolučního algoritmu na optimalizační úlohu vibračního generátoru.“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím informačních zdrojů a odborné literatury, které jsou uvedeny v seznamu literatury.

Bc. Nguyen Manh Thanh

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Zdeňku Hadašovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace a cenné rady. Mé poděkování patří i rodině, která mě podporovala během celé doby studia.

Bc. Nguyen Manh Thanh

Obsah

1	Úvod	12
2	Formulace problému stanovení cílů	13
3	Algoritmy globální optimalizace	14
3.1	Enumerativní	14
3.2	Deterministické	15
3.3	Stochastické	15
3.4	Smíšené	15
4	Evoluční algoritmy	17
4.1	Evoluční strategie	19
4.2	Genetické algoritmy	19
4.3	Diferenciální evoluce	20
4.4	SamoOrganizující se Migrační Algoritmus (SOMA)	20
4.4.1	Princip fungování algoritmu SOMA	20
4.4.2	Vliv řídicích parametrů	20
4.4.3	Vlastnosti	22
5	Popis piezoelektrického generátoru	23
5.1	Analytický model	23
5.2	Volba řídicích veličin	25
5.3	Vyjádření závislých proměnných	25
5.3.1	Rozměrové veličiny	25
5.3.2	Hmotnost	25
5.3.3	Kapacita	26
5.3.4	Youngův modul pružnosti	27
5.3.5	Kvadratický moment průřezu	27
5.3.6	Převodní poměry	27
5.3.7	Tuhost	28
6	Implementace SOMA	29
6.1	Nastavení algoritmu	29
6.2	Omezení argumentů	29
6.3	Účelová funkce	30
6.4	Penalizace	30
6.5	Optimalizace na harmonické buzení	32
7	Citlivostní analýza	34
7.1	Vliv přidané hmotnosti	34
7.2	Vliv rozměrů nosníku	35
7.3	Vliv odporu elektrické zátěže	38
7.4	Vliv délky elektrody	40
7.5	Vliv tloušťky piezovrstvy	42

8	Optimalizace na reálné vibrace	43
8.1	Vibrace mostu	43
8.2	Pohyb člověka	48
9	Závěr	53
	Literatura	54
	Seznam použitých zkratk a symbolů	56
	Seznam obrázků	58
	Seznam tabulek	59
	Seznam příloh	60

1. Úvod

Spousta problémů z praxe, a nejen z inženýrské oblasti, představuje svým způsobem hledání určitého optima. Smyslem globální optimalizace je pak nalézt takové hodnoty argumentů při kterých daná funkce nabývá nejnižší (minimum) nebo nejvyšší hodnoty (maximum). Tento úkol může na první pohled znít jednoduše, obecně však platí, že opak je pravdou.

Postupem času bylo pro řešení tohoto typu problému vyvinuto množství různých metod a přístupů. V úvodní části práce bude představení algoritmů, jejich třídění a stručný popis. Speciální pozornost bude věnována evolučním algoritmům, které představují velice užitečný a výkonný nástroj v oblasti optimalizace.

Součástí práce je implementace vybraného algoritmu pro nalezení optimálních parametrů piezoelektrického generátoru. Tento typ generátoru patří do skupiny tzv. energy harvesterů, tedy zařízení, které je schopno přeměňovat energii z okolí na energii elektrickou. V tomto případě je využíváno piezoelektrického jevu ke zužitkování mechanické energie z vibrací. Cílem optimalizace bude maximalizovat dodávaný elektrický výkon z různých vstupních signálů.

Jakožto samostatné zdroje energie mají „energy harvestery“ potenciál hrát důležitou roli při rozvoji „IOT“ (internet věcí) zařízení, kde by mohli zajistit napájení zařízení a sensorů bez nutnosti přívodu vodičů a závislosti na elektrickou síť. Další možné uplatnění je například v oblasti nositelné elektroniky, pro kterou by se omezil, ne-li úplně eliminoval, požadavek častého nabíjení. S ohledem na tyto aplikace bude přizpůsoben i výběr vstupních signálů pro účely optimalizace.

2. Formulace problému stanovení cílů

Neduhem současných vibračních generátorů je nízký produkovaný elektrický výkon. Jako zdroje energie jsou navíc vysoce citlivé na frekvenci vstupních vibrací a nezanedbatelný výkon jsou schopny produkovat pouze v úzkém pásmu rezonance. Signály reálných vibrací jsou však pro každou aplikaci specifické. Odlišují se jak frekvencí, tak amplitudou. Z tohoto důvodu není vhodné užití univerzální konstrukce pro konkrétní aplikace.

Dodávaný výkon závisí také na mnoha vlastních parametrech generátoru jako je připojená elektrická zátěž nebo vlastní frekvence, která je závislá na rozměrech, váze a materiálovém rozložení. Nalezení ideální konfigurace tedy představuje problém globální optimalizace funkce s více proměnnými.

Všechny jmenované faktory představují komplikace, které tento problém dělá neřešitelný analytickou cestou. Tato práce bude věnována zkoumáním možností evolučních algoritmů pro řešení tohoto typu problému. Cílem pak bude aplikovat vybraný algoritmus pro návrh optimální konstrukce pro maximalizaci produkce elektrické energie z reálných vibrací.

Pro aplikaci optimalizačního algoritmu bude také potřeba vytvoření modelu, který se bude přizpůsobovat změnám řídicích parametrů.

3. Algoritmy globální optimalizace

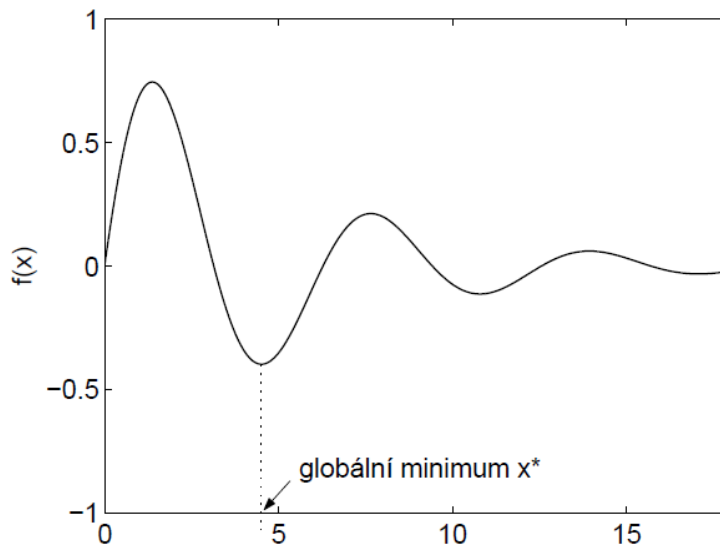
Pod pojmem globální optimalizace spadájí skupiny metod, jež slouží k nalezení hodnot argumentů funkce $f(x)$, při kterých nabývá nejmenší či největší hodnoty (globální extrém). Z definice platí, že globální minimum pro funkci $f(x)$ na množině D existuje, jestliže existuje $x_0 \in D$, že $f(x_0) = M$ a pro všechna $x \in D$ platí nerovnost $f(x) \geq M$. [13]

O této funkci se hovoří jako o účelové funkci a reprezentuje určitou kvalitu řešeného problému. Účelová funkce v úlohách z praxe pak může vyjadřovat vlastnosti jako jsou například hmotnost, výdej energie nebo cena, na které je kladen minimalizační požadavek.

Úlohou optimalizace se také zabývá matematická analýza. Aplikace jejich postupů je však limitována na nalezení extrému funkcí, u kterých existuje první a druhá derivace. Obecná úloha optimalizace se řadí do skupiny NP složitých problémů. To znamená, že neexistuje deterministický algoritmus, který by byl schopen nalézt řešení v polynomiálním čase. [17] Rostoucí výpočetní výkon počítačů spolu s rozkvětem informatiky v několika posledních desetiletí umožnil vznik a rozvoj nemalého počtu velice výkonných optimalizačních algoritmů schopných nalézat alespoň dostatečně dobrá řešení v rozumném čase i u velmi obtížných problémů.

Dle způsobu fungování lze tyto počítačové metody rozdělit do čtyř základních skupin [24]:

- Enumerativní
- Deterministické
- Stochastické
- Smíšené



Obrázek 3.1: Globální minimum [17]

3.1. Enumerativní

Metody spoléhající na hrubý výpočetní výkon, snaží se najít optimální výsledek prohledáním celého prostoru možných řešení. Jsou aplikovatelné na problémy pracující s diskřet-

ními hodnotami a malým prostorem řešení. U složitějších problémů je použití nevhodné z důvodu extrémní časové náročnosti [24].

3.2. Deterministické

Skupina algoritmů, která pro stejná vstupní data poskytují pokaždé stejný výsledek. V každém kroku svého procesu existuje maximálně jedno správné rozhodnutí dle předem nadefinovaných kritérií. Neexistuje-li žádná možnost dalšího pokračování, považuje se aktuální výsledek za konečný. Pro efektivní fungování těchto algoritmů je většinou potřeba splnit množství předpokladů [24]:

- prohledávaný prostor je spojitý,
- prohledávaný prostor je konvexní,
- účelová funkce je pokud možno unimodální (v prohledávaném úseku existuje pouze jeden extrém),
- je potřeba znát analytický popis problému.

3.3. Stochastické

Metody využívající pro svou funkci faktor náhody. To vede k tomu, že prohledávání může probíhat po celém prostoru nezávisle na kvalitě dosud nalezených výsledků nebo účelové funkci. Příkladem nejjednoduššího zástupce této skupiny je tzv. slepé prohledávání, kde se náhodně doplňují hodnoty argumentů a pokaždé je uložen jen dosud nejlepší výsledek. Nevýhodou je časová náročnost [17], [24]. Proto je užití stochastických metod vhodné spíše pro:

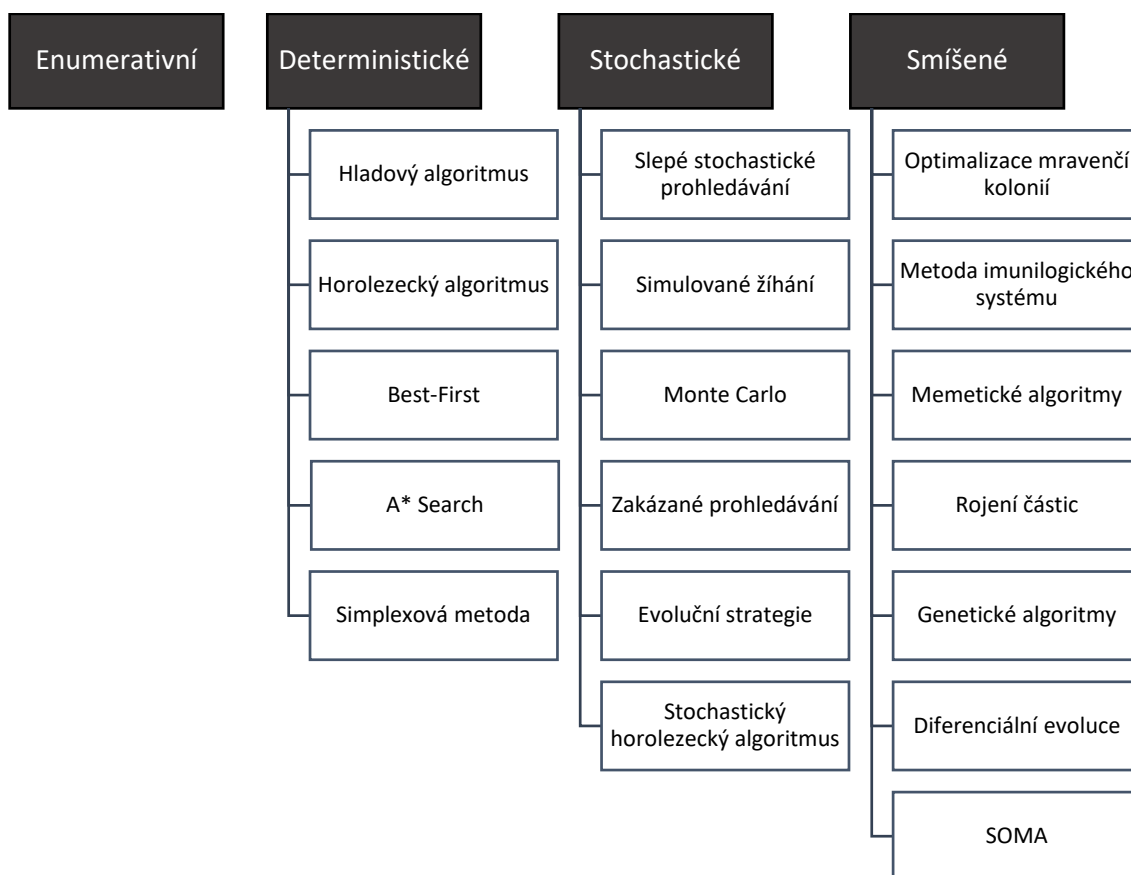
- hrubý odhad,
- řešení problému s malým rozsahem hodnot argumentů účelové funkce.

3.4. Smíšené

Jedná se o kombinaci deterministických a stochastických metod. Prvek náhody může být použit různými způsoby (mutace, perturbace,...). Silnou podmnožinou těchto algoritmů tvoří tzv. evoluční algoritmy. Smíšené metody nesou většinou tyto vlastnosti[24]:

- robustnost, nebo-li dokáží nalézt kvalitní řešení nezávislé na počátečních podmínkách,
- výkon a efektivita, při relativně malém počtu ohodnocení účelové funkce jsou schopny nalézat kvalitní řešení,
- mají minimální nebo nulové požadavky na předběžné informace,
- jsou schopné pracovat s problémy typu „černá skříňka“, tzn. že nepotřebují ke své činnosti analytický popis problému.
- dokáží během jednoho spuštění nalézt i více řešení.

3.4. SMÍŠENÉ



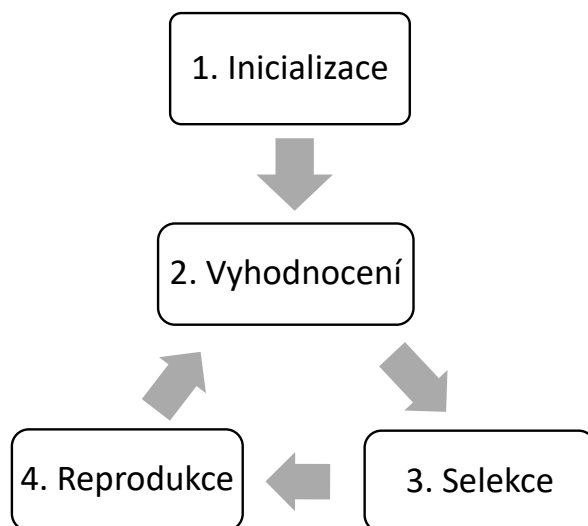
Obrázek 3.2: Seznam jednotlivých algoritmů a jejich možné zařazení

4. Evoluční algoritmy

Jako evoluční algoritmy označujeme skupinu heuristických metod, které nabývají na oblibě zejména díky aplikovatelnosti na praktických problémech, které by jinými způsoby byly jen obtížně řešitelné nebo vůbec. Jejich charakteristickým rysem je to, že využívají pro řešení problému tzv. populace, které jsou tvořeny množstvím jedinců. Každý jedinec představuje možné řešení problému – kombinaci argumentů účelové funkce. Vzájemným ovlivňováním se iteračně snaží dospět k optimálnímu výsledku. Využívají se při tom principy inspirované biologickou evolucí jako jsou například dědičnost, mutace, křížení, přirozený výběr anebo přežití silnějšího. [1]

Jedná se v podstatě o zjednodušené modely Darwinove evoluční teorie. Postup evolučních algoritmů obecně je možné znázornit schématem na obrázku 4.1, který popisuje základní kostru všech metod. Většinou se postup neobejde bez těchto kroků:

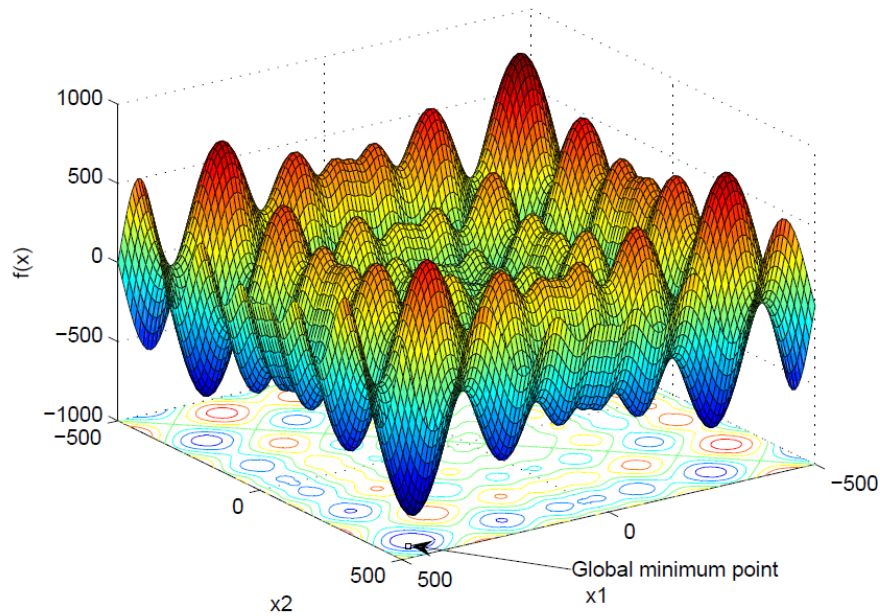
1. Inicializace – proces začíná vytvořením populace jedinců nesoucí počáteční (většinou náhodné) hodnoty argumentů účelové funkce.
2. Vyhodnocení – na základě nalezených výsledků je každému jedinci přiřazena hodnota „fitness“ vycházející z účelové funkce.
3. Selektce – výběr jedinců nejlepšími hodnotami „fitness“, kteří se stanou rodiči pro další generaci. Jedinci s nejhoršími hodnotami jsou z populace odstraněny.
4. Reprodukce – tvorba nových jedinců v populaci na základě pravidel daných metodou (*křížení* – sdílení informací dvou nebo více jedinců, *mutace* – náhodná změna některých hodnot,...).



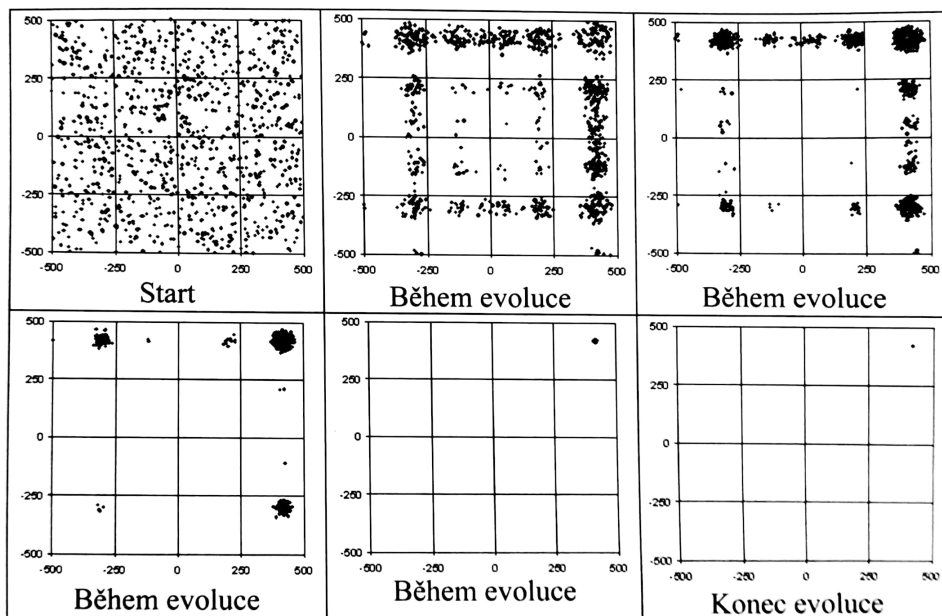
Obrázek 4.1: Průběh evolučních algoritmů

Kroky 2. až 4. jsou opakovány dokud není naplněn alespoň jeden z ukončovacích kritérií.

Populace se tedy v cyklech vyvíjí, starší a slabí jedinci jsou nahrazováni novými a silnějšími. Celý proces je řízen předem definovanými matematickými pravidly a podle toho jak jsou pravidla aplikována, určuje, o jakou metodu se jedná.



Obrázek 4.2: Schwefelova funkce – často využívaná pro testování optimalizačních metod nebo demonstraci jejich výkonu [17]



Obrázek 4.3: Konvergence populace evolučního algoritmu na Schwefelově funkci [24]

4.1. Evoluční strategie

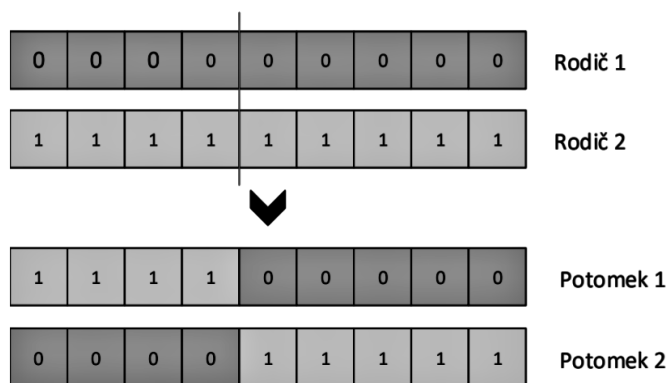
Patří mezi nejstarší zástupce evolučních algoritmů. Tuto metodu lze dále dělit na dvě hlavní strategie $(\mu/\rho, \lambda)$ a $(\mu/\rho + \lambda)$, kde μ je základní počet jedinců (rodičů), λ určuje kolik potomků je každou generaci vytvořeno a ρ vyjadřuje kolik rodičů se podílí na každém potomku. Zásadní rozdíl mezi jednotlivými strategiemi je, že verze $(\mu/\rho, \lambda)$ vybírá pro postup do další generace μ jedinců pouze z nově nalezených výsledků, kdežto $(\mu/\rho + \lambda)$ zachovává μ nejlepších výsledků ze všech dosud nalezených. [22]

Základní verze $(1 + 1)$ je speciálním případem $(\mu/\rho + \lambda)$. V algoritmu vystupuje jen jeden jedinec, ze kterého vlastní mutací vzniká jeden potomek. Pouze pokud je lepší než původní jedinec postupuje dalšího kola a cyklus se opakuje. [17]

4.2. Genetické algoritmy

Tato podskupina k evolučním algoritmům zahrnuje metody, které tvoří nové jedince v populaci pomocí dvou nebo více existujících jedinců. Každý jedinec nese informaci o svém aktuálním výsledku většinou formou binárního řetězce (chromozóm). Kvůli binárnímu kódování je navíc potřeba zavést překlad genotyp (binární hodnoty) \rightarrow fenotyp (konkrétní hodnoty z domény prohledávaného prostoru řešení). A na základě této hodnoty se staví „fitness“ jedince. [17]

Křížení je prováděno výměnou informací z rodičovských chromozómů. V případě n -bodového křížení jsou chromozomy v náhodných bodech rozděleny na $n+1$ částí, které jsou následně prohozeny. Stochastická složka je zajištěna pomocí mutace vybraných genů (členů binárního řetězce).



Obrázek 4.4: Jednobodové křížení [11]

Náhoda může být zakomponovaná i při výběru rodičů. Například užitím metody ruletového kola. Kde je jedincům přiřazena část ruletového kola podle jejich hodnoty „fitness“. Náhodným číslem se pak rozhoduje, který jedinec postoupí do reprodukčního procesu. Nejspíše nejpoužívanější metodou selekce je turnajový výběr [7]. Při něm se vytváří skupinky náhodně vybraných jedinců, ze které postupuje jeden až dva nejzdatnější.

4.3. Diferenciální evoluce

Jako všechny evoluční algoritmy pracuje s populací jedinců. Tvorba potomků probíhá pomocí čtyř existujících jedinců. První je postupně vybírán z populace, ostatní tři náhodně. Rozdíl prvních dvou náhodně vybraných jedinců se podílí na tzv. Váhovaném diferenčním vektoru (obdoba mutačního vektoru). Následným přičtením ke třetímu jedinci vzniká tzv. šumový vektor. Ten je poté použit pro křížení se zbývajícím jedincem. Pokud je nově vzniklý jedinec lepší, zůstává v populaci. [24]

4.4. SamoOrganizující se Migrační Algoritmus (SOMA)

Pokud měla být zachována biologická analogie pro popis SOMA, jednalo by se o křížení jedince s nejlepší hodnotou fitness s každým dalším jedincem v populaci, přičemž každému páru přežívá jen nejsilnější potomek. Mnohem běžněji se pro popis tohoto algoritmu používá spíše analogie se skupinou inteligentních jedinců, kde každý cestuje v prostoru možných řešení směrem k vedoucímu jedinci a sám se snaží obsadit co nejlepší pozici. Protože bude tato metoda aplikovaná na řešení problému v této práci, bude její popis podrobněji rozveden. [24]

4.4.1. Princip fungování algoritmu SOMA

Základem algoritmu SOMA je, stejně jako u ostatních evolučních algoritmů, práce s populací jedinců. V prvním kroku je vytvořena populace NP jedinců nesoucí vektor s náhodnými hodnotami argumentů účelové funkce. Porovnáním „fitness“ jedinců se určí jedinec s nejlepší hodnotou a takový jedinec je označen jako vůdčí („Leader“).

Poté následuje fáze spolupráce kdy se ostatní jedinci pokouší „Leadera“ následovat. Ve většině případů je ale jejich pohyb omezen a nemohou použít přímou cestu k „Leaderovi“. To je způsobeno perturbačním vektorem, který způsobuje, že se jedinci mohou pohybovat jen po $N-k$ dimenzích v N dimenzionální ploše možných řešení.

Dalším krokem je fáze soutěže, kdy se každý jedinec při své cestě za „Leadrem“ snaží získat pozici s nejlepší hodnotou vzhledem k účelové funkci a tam do dalšího kola setrvává. Tento proces (migrace) iteračně probíhá tak dlouho, dokud není naplněn ukončovací parametr. Jako ukončovací parametr se používá maximální počet migrací nebo maximální tolerovaný rozdíl mezi nejlepším a nejhorším jedincem.[24]

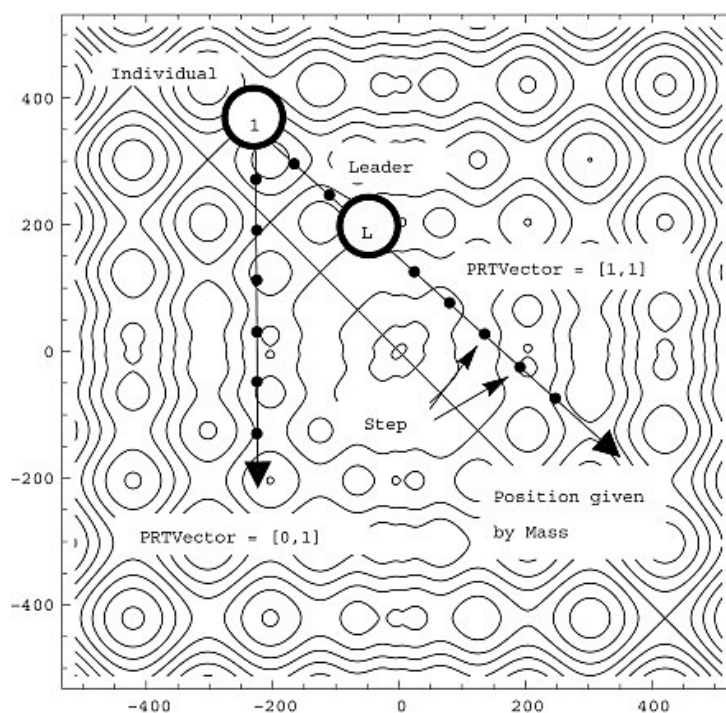
4.4.2. Vliv řídicích parametrů

Volba řídicích parametrů může významně ovlivnit běh algoritmu a tím se podílet na kvalitě nalezených výsledků. Zde je výpis řídicích parametrů algoritmu SOMA a jejich význam:

- **Mass** určuje poměrovou vzdálenost, kterou má aktivní jedinec ujet, než se zastaví vůči vzdálenosti mezi jeho aktuální polohou a polohou „Leadera“.
- **Step** představuje délku kroku, která rozhoduje, jak často bude aktivní jedinec při své cestě vyhodnocovat kvalitu dosažené polohy, tedy určovat hodnotu účelové

funkce. U tohoto parametru je důležité, aby nebyl celočíselný násobek jeho hodnoty roven 1. Předchází se tak duplikování výsledku „Leadersa“, které by snižovalo efektivitu prohledávání.

- **PRT** neboli perturbation je stochastická složka a ovlivňuje zastoupení hodnot v perturbačním vektoru. Rozměr perturbačního vektoru je roven množství optimalizovaných parametrů účelové funkce daného problému a každý člen vektoru může nabývat hodnoty 0 nebo 1. Hodnota PRT určuje s jakou pravděpodobností bude mít jednotlivý člen hodnotu 1. Perturbační vektor se v každém kole generuje pro každého jedince zvlášť a určuje, kterými dimenzemi se daný jedinec může pohybovat k vedoucímu jedinci.
- **NP** je počet jedinců v populaci. Určuje s kolika různými možnými řešeními se pracuje. Pro účinnost algoritmu se doporučuje volit $NP \geq 10$.
- **Migrace** je ukončovací parametr a udává kolik evolučních kol se má maximálně provést než se algoritmus zastaví a zobrazí výsledek.
- **AccError** je další ukončovací parametr. Představuje rozdíl mezi nejlepším a nejhorším výsledkem.



Obrázek 4.5: Vliv řídicích parametrů na chování jedinců [2]

Na základě nastavených parametrů lze pak určit N_{eval} počet ohodnocení účelové funkce:

$$N_{eval} = \frac{(NP - 1) \times Mass \times Migrace}{Step}. \quad (4.1)$$

Obecně platí, že čím složitější problém se očekává (mnoho lokálních extrémů, více-dimenzionální prostor řešení,...), tím je vhodnější volit řídicí parametry tak, aby byl počet ohodnocení co nejvyšší. S tím ale bohužel rostou i časové nároky na běh algoritmu.

4.4. SAMOORGANIZUJÍCÍ SE MIGRAČNÍ ALGORITMUS (SOMA)

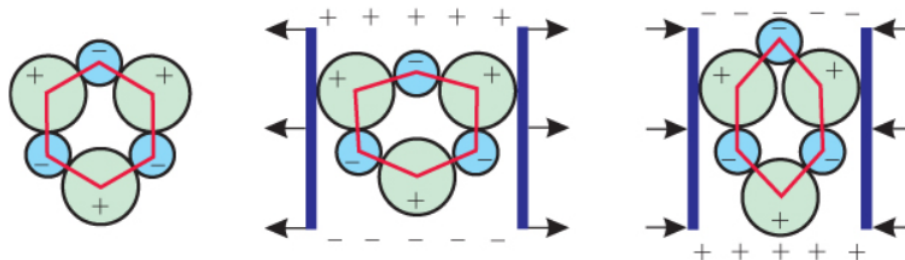
4.4.3. Vlastnosti

SOMA se osvědčila při řešení široké škály problémů. Dovedou pracovat s různými obtížemi jako jsou velký počet lokálních extrémů a mnohdimenzionální prostor řešení. Mezi významné vlastnosti SOMA patří:

- Algoritmus je jednoduchý na pochopení a implementaci. Po správném nastavení nevyžaduje častý zásah uživatele.
- Nevyžadují další znalosti účelové funkce.
- Schopnost pracovat s různými číselnými typy. V argumentech lze bez problémů kombinovat reálná a celá čísla nebo množinu konkrétních hodnot.
- Rozsáhlé prohledání prostoru možných řešení. Díky krokování a pohybu v omezeném počtu dimenzí není populace náchylná k rychlé konvergenci do lokálních extrémů.
- Schopnost poskytnout vícenásobné řešení. Pokud je globálních extrémů více, existuje slušná šance, že budou objeveny. V posledním kole je pak možné uložit výsledky libovolného počtu jedinců pro případ, že by nejlepší jedinec z nějakého důvodu nevyhovoval.

5. Popis piezoelektrického generátoru

Předmětem optimalizace této práce bude vibrační generátor využívající přímého piezoelektrického jevu. Základem tohoto jevu jsou látky s iontovou vazbou a krystalovou mřížkou se středově nesymetrickým rozmístěním iontů. A to tak, že se v klidném stavu jeví na venek elektricky neutrálně. Za působení mechanického napětí dochází k deformaci mřížky a posunu iontů. Z deformovaného nesymetricky uspořádaného krystalu se stává elektrický dipól a na jeho plochách vzniká náboj. [16][10]



Obrázek 5.1: Vznik náboje v krystalu piezoelektrické látky [18]

Komerčně vyráběné generátory hojně využívají provedení ve formě vetknutého nosníku. Pro další práci bude uvažována bimorfni konstrukce - aktivní piezoelektrický materiál pokrývá horní a spodní vrstvu nosníku. Tento typ generátoru pracuje v módu 31, to znamená, že využívá mechanické napětí v podélném směru k vytvoření elektrického náboje ve směru příčném. Směry jsou znázorněny na obr. 5.5.



Obrázek 5.2: Piezoelektrický generátor – Midé V21BL [12]

5.1. Analytický model

K popisu chování tohoto systému bude sloužit zjednodušený model vycházející z prací [4], [14] a především práce [6], která se mimo modelování věnuje i verifikaci.

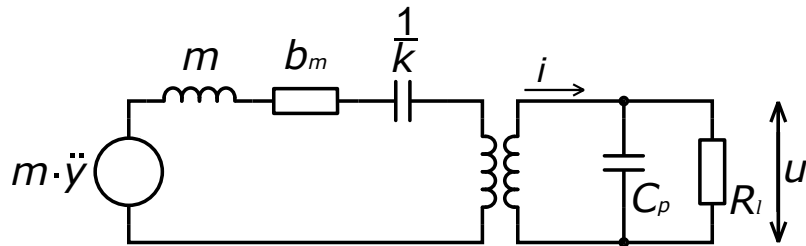
$$m\ddot{y} = m\ddot{z} + b_m\dot{z} + kz - \theta u \quad (5.1)$$

$$\underbrace{\theta\dot{z}}_i = C_p\dot{u} + \frac{1}{R_l}u \quad (5.2)$$

Rovnice 5.1 představuje pohybovou rovnici mechanického kmitání obohacenou o složku elektromechanické přeměny energie. Veličiny na levé straně rovnice jsou ekvivalentní hmotnost nosníku m a vstupní zrychlení (základny) \ddot{y} . Veličiny na pravé straně představují b_m mechanické tlumení nosníku, k tuhost, θ převodní veličina mezi elektrickou a mechanickou částí, z posuv na konci nosníku a u vstupní napětí.

5.1. ANALYTICKÝ MODEL

Druhá rovnice 5.2 zastupuje elektrickou část systému. C_p zde zastupuje kapacitu generátoru a R_l je zátěžný odpor. Dohromady lze tuto soustavu rovnic vnímat jako elektrický obvod s transformátorem dle schématu na obrázku 5.3 i pak představuje proud procházející sekundární cívkou transformátoru.



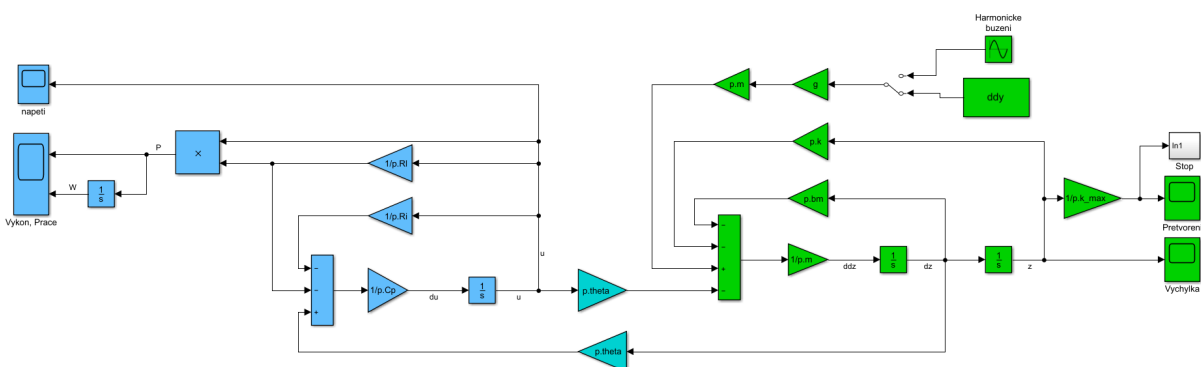
Obrázek 5.3: Schéma náhradního obvodu

Pro další práci je praktičtější využít zápis ve tvaru první stavové rovnice:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b_m}{m} & \frac{\theta}{m} \\ 0 & \frac{\theta}{C_p} & -\frac{1}{R_l C_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{y} \quad (5.3)$$

Při použití modelu je třeba mít na vědomí určitá omezení a zavedené předpoklady:

- Nosník pracuje pouze v malém rozsahu výchylek.
- Jednoosá napjatost – ohybovým namáháním vzniká pouze normálové napětí, smyková napětí jsou zanedbaná.
- Uvažuje se pouze první vlastní tvar kmitání.
- Konstantní průřezové charakteristiky po celé délce – piezoelektrický materiál se rozkládá po celé délce na rozdíl od komerčně dostupných výrobků, u kterých se materiál nachází pouze pod plochou elektrody.



Obrázek 5.4: Model v prostředí simulink

5.2. Volba řídicích veličin

Je potřeba stanovit, které veličiny jsou nezávislé proměnné a budou do rovnic vstupovat jako jako jejich argument. Pro ostatní proměnné je potřeba vyjádřit. Tato práce se bude zabývat především optimalizací různých parametrů bez změny materiálů. Následující tabulka zobrazuje, které veličiny byly vybrány jako řídicí:

Tabulka 5.1: Seznam řídicích veličin

Význam	Značení
Hmotnost závaží	m_z
Odpor elektrické zátěže	R_l
Celková délka nosníku	l_c
Poměrová délka elektrod vůči l_c	p_{le}
Celková tloušťka nosníku	t_c
Poměrová zastoupení piezovrstev vůči t_c	p_{tp}
Šířka nosníku	w

5.3. Vyjádření závislých proměnných

5.3.1. Rozměrové veličiny

První závislou proměnou je délka elektrody l_e . Elektrody obklopují každou vrstvu piezoelektrického materiálu z obou stran a slouží k odvedení vytvořeného náboje do obvodu. Pro zjednodušení se uvažuje se její šířka shodná s šířkou nosníku. Délka je závislá na řídicích veličinách p_{le} a l_c :

$$l_e = p_{le} l_c. \quad (5.4)$$

Podobně se spočítá tloušťka vrstvy piezoelektrického materiálu t_p závislá na řídicích veličinách p_{tp} a t_c :

$$t_p = \frac{p_{tp} t_c}{2}. \quad (5.5)$$

Vzdálenost středu piezovrstvy od neutrální osy je značena b a je rovna:

$$b = \frac{t_p + (1 - t_p)}{2}. \quad (5.6)$$

5.3.2. Hmotnost

Reálná hmotnost nosníku je závislá na jeho rozměrech a materiálovém složení. Zde zavedeme zjednodušení, že se nosník skládá pouze, ze dvou materiálů. Ve středové části je uvažován materiál o hustotě ρ_s a na krajních vrstvách piezoelektrický materiál o hustotě ρ_p . Ostatní vrstvy (lepidlo, elektrody, povrchová folie,...) budou vzhledem k jejich menšinovému zastoupení zanedbány. Vlastní hmotnost nosníku je pak rovna:

$$m_r = (1 - p_{tp}) p_c l_c w \rho_s + p_{tp} p_c l_c w \rho_p. \quad (5.7)$$

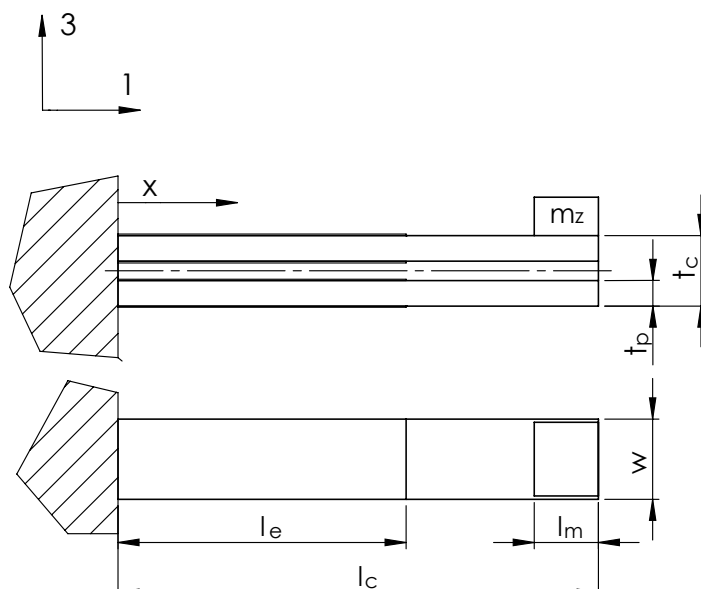
5.3. VYJÁDŘENÍ ZÁVISLÝCH PROMĚNNÝCH

Aby bylo možné modelovat vetknutý nosník jako systém s jedním stupněm volnosti, je třeba přepočítat reálnou hmotnost na ekvivalentní. K tomu bude využita aproximace [15]:

$$m_0 = \frac{33}{140} m_r. \quad (5.8)$$

Celková hmotnost je pak:

$$m = m_0 + m_z. \quad (5.9)$$



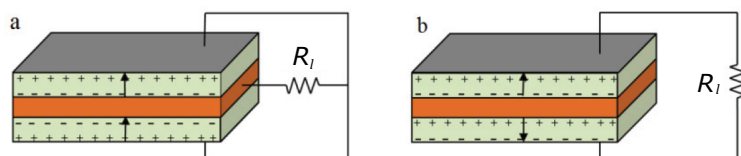
Obrázek 5.5: Schéma nosníku

5.3.3. Kapacita

Elektrody na povrchu piezoelektrických vrstev tvoří deskové kondenzátory jejichž ekvivalentní kapacita je rovna

$$C_p = a^2 \varepsilon_{33} \frac{S_e}{2t_p} = a^2 \varepsilon_{33} \frac{w l_e}{2t_p}, \quad (5.10)$$

kde ε_{33} je absolutní permitivita piezoelektrického materiálu. A jelikož popisovaný nosník bimorfnní konstrukce obsahuje dva takové kondenzátory parametr $\frac{a^2}{2}$ zohledňuje způsob jejich zapojení. Pro sériové zapojení platí $a = 1$, pro paralelní $a = 2$.



Obrázek 5.6: a) paralelní zapojení, b) sériové zapojení elektrod [5]

5.3.4. Youngův modul pružnosti

Uvažuje-li se kompozitní konstrukce složená pouze ze dvou materiálů, pak lze výsledný Youngův modul nosníku aproximovat vztahem:

$$Y = Y_p \left(\frac{t_p}{t_c} + \frac{Y_s}{Y_p} \left(1 - \frac{t_p}{t_c} \right) \right). \quad (5.11)$$

5.3.5. Kvadratický moment průřezu

Na kompozitní strukturu nosníku je třeba brát zřetel i při výpočtu kvadratického momentu, ten dán vztahem [14]:

$$I = 2 \left(\frac{t_p^3 w}{12} + b^2 t_p w \right) + \frac{Y_s}{Y_p} \frac{w (t_c (1 - p_{tp}))^3}{12}. \quad (5.12)$$

5.3.6. Převodní poměry

Převodní charakteristiku θ lze dle [6] a [14] spočítat následujícím způsobem:

$$\theta = \frac{ad_{31} Y w l_e}{k_s}, \quad (5.13)$$

kde d_{31} je piezoelektrická nábojová konstanta dána materiálem, k_s je převodní konstanta mezi výchylkou z a přetvořením S , způsobené středním napětím v piezoelektrickém materiálu:

$$k_s = \frac{z}{S}. \quad (5.14)$$

Pro určení k_s je třeba stanovit rovnici průběhové čáry nosníků. Vychází se z této diferenciální rovnice:

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{M(x)}{YI} = \frac{F}{YI} \left(l_c - \frac{l_m}{2} - x \right). \quad (5.15)$$

Dvojitou integrací s okrajovými podmínkami pro vetnutý nosník je obdržena rovnice průhybové čáry.

$$\text{OP: } x = 0 : \frac{dz}{dx} = 0, \quad (5.16)$$

$$x = 0 : z = 0, \quad (5.17)$$

$$\frac{dz}{dx} = \frac{F}{YI} \left(l_c x - \frac{l_m}{2} x - \frac{x^2}{2} \right), \quad (5.18)$$

$$z = \frac{F}{YI} \left(\frac{l_c}{2} x^2 - \frac{l_m}{4} x^2 - \frac{x^3}{6} \right). \quad (5.19)$$

Pro určení výchylky v bodě pod těžištěm závaží dosadíme $x = l_c - \frac{l_m}{2}$. Po úpravě je pak obdržen vztah:

$$z = \frac{F \left(l_c - \frac{l_m}{2} \right)^3}{3YI}. \quad (5.20)$$

5.3. VYJÁDŘENÍ ZÁVISLÝCH PROMĚNNÝCH

Pro přetvoření ve středu piezoelektrického materiálu platí:

$$S = \frac{M(x)}{YI}b = \frac{F}{YI} \left(l_c - \frac{l_m}{2} - \frac{l_e}{2} \right) b. \quad (5.21)$$

Po vyjádření síly F ze vztahů 5.20 a 5.21 a lze tyto vztahy dosadit do rovnosti:

$$\frac{3YIz}{\left(l_c - \frac{l_m}{2} \right)^3} = \frac{YIS}{b \left(l_c - \frac{l_m}{2} - \frac{l_e}{2} \right)} \quad (5.22)$$

Následně je možné určit vztah mezi přetvořením a výchylkou:

$$k_s = \frac{\left(l_c - \frac{l_m}{2} \right)^3}{3b \left(l_c - \frac{l_m}{2} - \frac{l_e}{2} \right)} \quad (5.23)$$

5.3.7. Tuhost

Pro výpočet tuhosti je opět vycházeno z rovnice 5.20 a platí:

$$k = \frac{F}{z} = \frac{3YI}{\left(l_c - \frac{l_m}{2} \right)^3} \quad (5.24)$$

6. Implementace SOMA

Implementace algoritmu proběhla v programovém prostředí MATLAB a celý program se skládá z několika dílčích částí.

1. Inicializace parametrů
2. Samotný algoritmus SOMA – otevřený zdrojový kód je dostupný na webu [23].
3. Model v Simulinku – sestaven na základě analytického popisu (rov. 5.3).
4. Vyhodnocovací funkce – její úkolem je na základě nalezených řešení přepočítat parametry modelu. Spustit simulaci a z průběhů sledovaných veličin vypočítat hodnotu účelové funkce.

Dále budou v této kapitole popsána důležitá nastavení a další kroky nezbytné před samotným spuštěním algoritmu.

6.1. Nastavení algoritmu

Parametry algoritmu byly nastaveny na základě doporučení z literatury [24] a předpokládané složitosti problému.

Tabulka 6.1: Parametry algoritmu

Parametr	Hodnota
Mass	2,04
Step	0,17
PRT	0,2
NP	12
Migrace	30
AccError	1%

6.2. Omezení argumentů

Volba omezení je důležitým nastavením, který zajišťuje, že se nalezené výsledky budou nacházet v žádaném rozsahu hodnot. Rozsah argumentů přímo vymezuje velikost prohledávaného prostoru. Předchází se tím také prohledávání nesmyslných či fyzikálně nemožných řešení (záporná hmotnost či rozměry,...). Hraníční hodnoty řídicích veličin v této práci byly zvoleny tak, že lehce přesahují rozsah hodnot reálných výrobků. Dojde-li k tomu, že jedinec při migraci překročí některou z hranic, bude nahrazen novým jedincem s náhodnými parametry. Pozitivním vedlejším následkem tohoto opatření je mimo jiné i zvýšení rozmanitosti populace. [24]

6.3. ÚČELOVÁ FUNKCE

Tabulka 6.2: Rozsah argumentů

Veličina	Značení	Rozsah	Rozměr
Hmotnost závaží	m_z	0 – 15	g
Odpor elektrické zátěže	R_l	1 – 10000	$k\Omega$
Celková délka nosníku	l_c	10 – 100	mm
Poměrová délka elektrod vůči l_c	p_{le}	0.01 – 1	–
Celková tloušťka nosníku	t_c	0.5 – 3	mm
Poměrová zastoupení piezovrstev vůči t_c	p_{tp}	0.01 – 0.99	–
Šířka nosníku	w	10 – 50	mm

6.3. Účelová funkce

Stěžejním krokem při řešení optimalizačních úloh je stanovení účelové funkce. Tato funkce by měla co nejlépe reflektovat sledované kvality optimalizovaného předmětu v závislosti na vstupních argumentech. V případě této práce bude cílem maximalizace elektrické energie vyprodukované piezoelektrickým generátorem. K určení hodnoty účelové funkce bude využít vztah pro určení středního elektrického výkonu po dobu t_f :

$$\max P_s = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \frac{u(t)^2}{R_l} dt \quad (6.1)$$

Přestože většina algoritmů je navržena pro řešení minimalizačních úloh, nepřestavuje maximalizační požadavek pro jejich aplikaci žádné omezení. Jedná se spíše o záležitost vhodné formulace problému. V praxi se to pak řeší jednoduchým předefinováním účelové funkce změnou jejího znaménka. Jelikož platí ekvivalence:

$$\max f(\mathbf{x}) = \min (-f(\mathbf{x})), \quad (6.2)$$

je i následující výraz ekvivalentní s 6.1.

$$\min (-P_s) = -\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} \frac{u(t)^2}{R_l} dt \quad (6.3)$$

Mimo maximalizační požadavek na produkovaný výkon, je možné do účelové funkce zakomponovat i další nároky, například minimální rozměry. A jelikož se pro generovaný výkon nachází účelová funkce pouze v záporných číslech, bude celkový objem V_c nosníků ovlivňovat její hodnotu nepřímou úměrou.

6.4. Penalizace

Další prvek který je možné zakomponovat do účelové funkce je penalizace. Smyslem penalizace je umělé navyšování hodnoty účelové funkce se záměrem znevýhodňovat určité stavy vycházející z omezení. V případě piezoelektrického nosníku je zavedeno omezení – kritické přetvoření S_{crit} . Nabízí se zde možnost přičítat sankci v závislosti na rozdílu mezi maximálním naměřeným přetvořením modelu S_{max} a S_{crit} . Tento přístup k penalizaci má

na rozdíl od úplného zakázání nebo přičítání konstantní hodnoty ty výhody, že prohledávaný prostor zůstává spojitý a i v případě, že by se všichni jedinci ocitli v penalizované oblasti řešení, rychle naleznou cestu ven kvůli vzrůstajícím hodnotám směrem od hranice omezení. Finální tvar účelové funkce má pak tuto podobu:

$$f(\mathbf{x}) = \begin{cases} -\frac{P_s}{V_c} & \text{je-li } S_{max} \leq S_{crit}, \\ -\frac{P_s}{V_c} + C(S_{max} - S_{crit}) & \text{je-li } S_{max} > S_{crit}, \end{cases} \quad (6.4)$$

konstanta C je kladné číslo, které dodává penalizaci váhu. Maximální dovolené přetvoření S_{crit} podle výrobce $S_{crit} = 8 \times 10^{-4}$ [9]. Nejvyšší dosažené přetvoření S_{max} je počítáno jako přetvoření bodě největšího namáhání při nejvyšší naměřené výchylce z_{max} .

$$S_{max} = \frac{z_{max}}{k_{max}}, \quad (6.5)$$

kde se převodní konstanta k_{max} spočítá podobně jako v případě rov. 5.23. Pro ohýbaný vetknutý nosní platí, že největší mechanické napětí, a s ním i přetvoření, vzniká v místě vetknutí ($x = 0$) a na povrchu tělesa, v největší vzdálenosti od neutrální osy. Přizpůsobení rov. 5.23 s ohledem na tyto skutečnosti je pak obdržén vztah:

$$k_{max} = \frac{2(l_c - \frac{l_m}{2})^3}{3t_c(l_c - \frac{l_m}{2})}. \quad (6.6)$$

6.5. Optimalizace na harmonické buzení

Pro otestování funkce algoritmu proběhla série pokusu o optimalizaci nosníku na harmonické buzení. Základem je model popsáný v jedné z předchozích kapitol 5. Účelová funkce je spočítána pomocí průběhů napětí a přetvoření získaných prostřednictvím simulací v Simulinku. První sada vstupních signálů má stejnou frekvenci a proměnlivou amplitudu. Druhá naopak má neměnnou amplitudu a rozdílné frekvence.

Tabulka 6.3: Výsledky optimalizace na buzení s různou amplitudou

	Hodnoty			Jednotky
	\mathbf{x}_1	\mathbf{x}_2	\mathbf{x}_3	
Amplituda buzení	0,5	1	1,5	G
Frekvence buzení	50	50	50	Hz
Číslo výsledku	\mathbf{x}_1	\mathbf{x}_2	\mathbf{x}_3	
Vlastní frekvence f	48,85	47,45	51,40	Hz
Přidaná hmotnost m_z	14,01	0,71	3,13	g
Odpor zátěže R_z	307,87	1 637,24	305,03	$k\Omega$
Celková délka l_c	69,73	86,01	66,41	mm
Poměrová délka elektrody p_{te}	52,84	35,95	40,03	%
Celková tloušťka t_c	1,38	1,15	1,02	mm
Poměrová tloušťka piezovrstvy p_{tp}	87,14	86,18	82,47	%
Šířka w	25,78	12,69	17,32	mm
Přetvoření S_{max}	$7,98 \times 10^{-4}$	$7,34 \times 10^{-4}$	$7,97 \times 10^{-4}$	–
Střední výkon P_s	17,39	3,27	3,88	mW
Hodnota $f(\mathbf{x})$	$-7,03 \times 10^4$	$-2,60 \times 10^4$	$-3,32 \times 10^4$	

Tabulka 6.4: Výsledky optimalizace na buzení s různou frekvencí

	Hodnoty			Jednotky
Amplituda buzení	1	1	1	G
Frekvence buzení	10	50	100	Hz
Číslo výsledku	\mathbf{x}_4	\mathbf{x}_5	\mathbf{x}_6	
Vlastní frekvence f	12,17	48,27	98,59	Hz
Přidaná hmotnost m_z	6,55	2,52	8,75	g
Odpor zátěže R_z	553,85	304,72	137,33	$k\Omega$
Celková délka l_c	89,30	90,94	67,12	mm
Poměrová délka elektrody p_{le}	34,53	48,92	45,45	%
Celková tloušťka t_c	0,53	1,45	2,01	mm
Poměrová tloušťka piezovrstvy p_{tp}	97,91	82,76	90,12	%
Šířka w	27,88	18,49	21,40	mm
Přetvoření S_{max}	$8,00 \times 10^{-4}$	$7,98 \times 10^{-4}$	$5,20 \times 10^{-4}$	–
Střední výkon P_s	0,71	15,22	13,76	mW
Hodnota $f(\mathbf{x})$	$-0,54 \times 10^4$	$-6,25 \times 10^4$	$-4,77 \times 10^4$	

Celkové rozměry l_c , t_c a w jsou nastaveny především tak, aby spolu s celkovou hmotností naladily vlastní frekvenci generátoru blízko k frekvenci buzení.

Nalezené výsledky pro poměrovou délku elektrod nabývají hodnot $p_{le} \in \langle 34,56\% - 52,84\% \rangle$, v tomto rozsahu se nejspíše nachází kompromis mezi množstvím aktivního materiálu a kapacity.

Pro zastoupení piezoelektrického materiálu v tloušťce byly obdrženy hodnoty $p_{tp} \in \langle 82,76\% - 97,91\% \rangle$ na rozdíl od p_{le} se navíc podílí i na materiálovém složení a přímo ovlivňuje výsledný modul pružnosti a tím i tuhost a frekvenci.

Co se týče optimální velikosti zátěžného odporu, výsledky se pohybují v širokém rozsahu $R_l \in \langle 137 - 1637k\Omega \rangle$. Nejčastěji se však hodnoty pohybují lehce nad $R_l = 300k\Omega$. Pro lepší pochopení vlivů různých parametrů bude provedena citlivostní analýza.

Na všech výsledcích, až na jeden, lze pozorovat snahu algoritmu vyhledávat řešení s co největším možným přetvořením s hodnotami až na hranici S_{crit} . Proto by mě být před užitím v praxi a výrobou kladen důraz na vhodné určení mezní hodnoty S_{crit} s určitou bezpečností a měly být zohledněny možné zvýšené hodnoty vstupního zrychlení nad rámec běžného pracovního rozsahu.

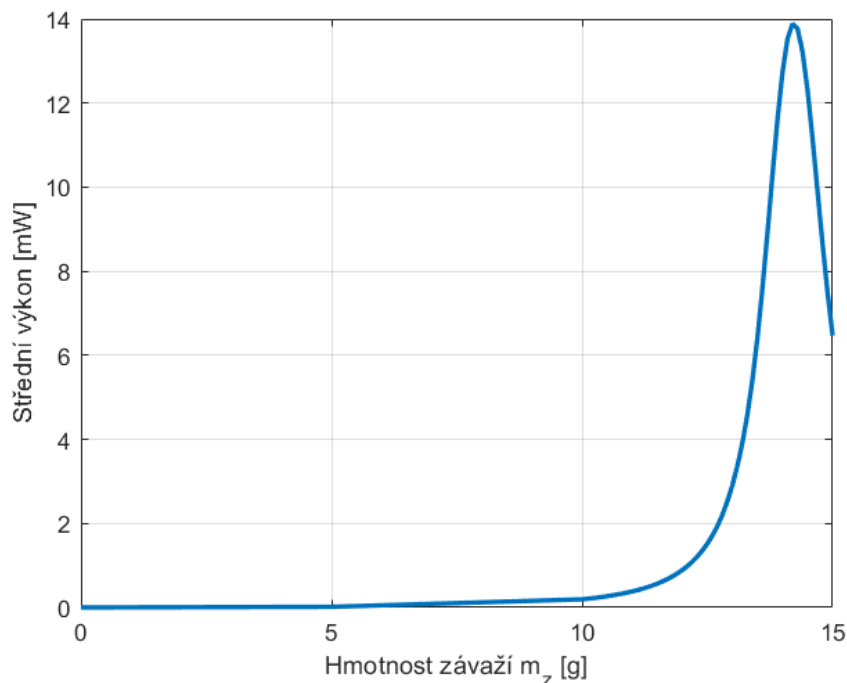
Jednotlivé hodnoty účelové funkce i výkonu se značně odlišují. To může mít různé příčiny. Za prvé, penalizace mohla v některých případech omezit prohledávaný prostor řešení tak, že lepší výsledky nebyly k dispozici. Druhá a pravděpodobnější varianta je, že nalezený výsledek je pouze lokálním minimem. S určitostí lze říci, že to platí minimálně v případě \mathbf{x}_2 , kde byly parametry laděny na stejný vstup jako v případě \mathbf{x}_5 . Výsledky jsou však násobně rozdílné. Evoluční algoritmy nezaručují nalezení globálního extrému, vhodným nastavením lze pouze navýšit pravděpodobnost úspěchu.

7. Citlivostní analýza

Na základě nalezených výsledků v předchozí kapitole bude provedena citlivostní analýza. A to tak, že se z vybraného výsledku bude zvolený jeden parametr, který bude proměnlivý, kdežto ostatní zůstávají konstantní. Sledován bude především generovaný výkon, případně přetvoření, v závislosti na zvoleném parametru. Následující prezentované průběhy vycházejí z vyšetření výsledků \mathbf{x}_1 z tab. 6.3.

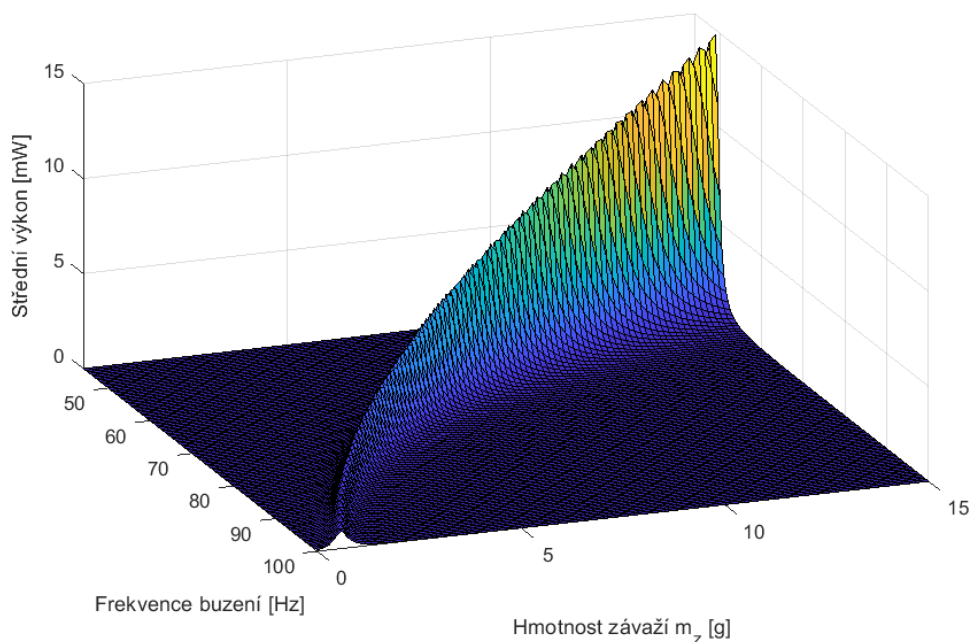
7.1. Vliv přidané hmotnosti

Hmotnost je úzce spojena s vlastní frekvencí soustavy. Pro danou konfiguraci, především rozměrů, se v průběhu nachází jedno maximum, které odpovídá i nalezená hodnota $m_z = 14,01g$.



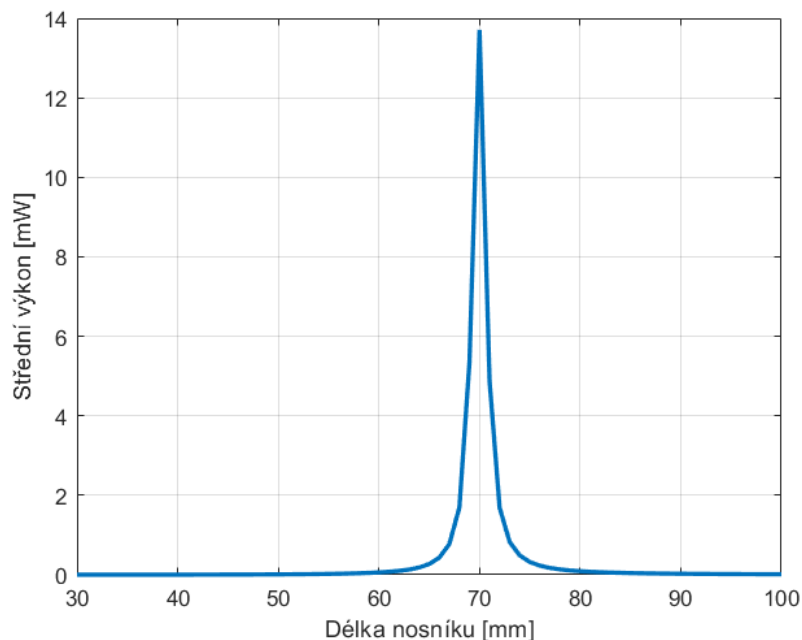
Obrázek 7.1: Závislost generovaného výkonu na m_z

Graf na obr. 7.2 ukáže, že výkon je rostoucí funkcí hmotnosti při klesající vlastní frekvenci.

Obrázek 7.2: Závislost generovaného výkonu na m_z a frekvenci buzení

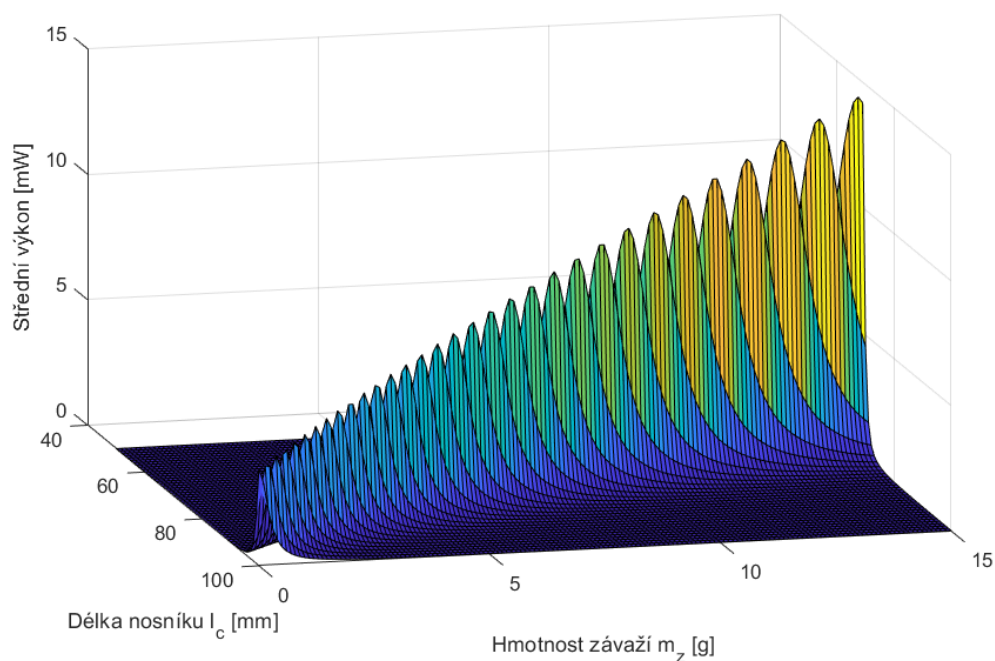
7.2. Vliv rozměrů nosníku

Optimální délka l_c leží ve velmi úzkém pásmu hodnot. To souvisí s tím, že délka nosníku ovlivňuje jeho tuhost s třetí mocninou (rov. 5.24) a i malá změna délky může způsobit značné odladění frekvence systému. Podobný průběh má i vliv tloušťky, jelikož zase vstupuje do kvadratického momentu s třetí mocninou (rov. 5.12).

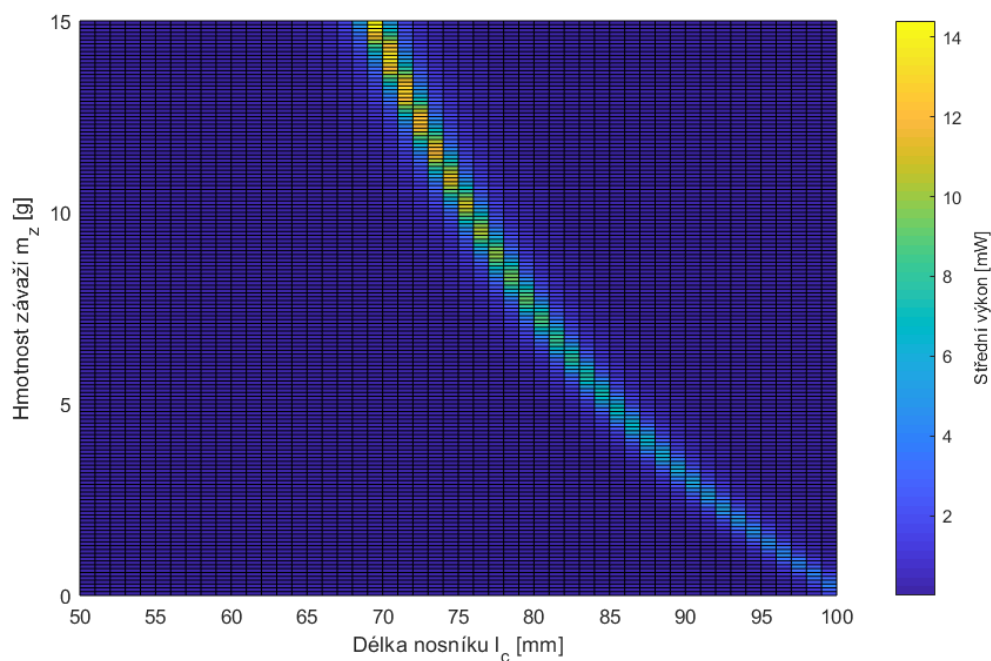
Obrázek 7.3: Závislost generovaného výkonu na l_c

7.2. VLIV ROZMĚRŮ NOSNÍKU

Z obrázku 7.5 je patrný trend rostoucího výkonu s hmotností zátěže a klesající délky. Tento trend je formován rostoucími vrcholky (obr. 7.4), které reprezentují polohu suboptimálních dvojic m_z a l_c a tvoří množství lokálních extrémů.

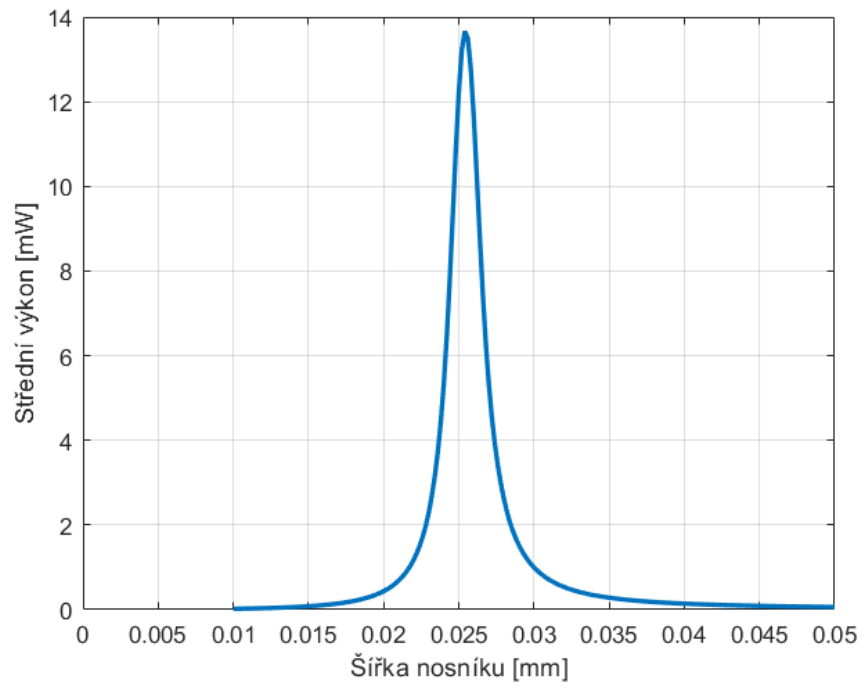


Obrázek 7.4: Závislost generovaného výkonu na l_c a m_z



Obrázek 7.5: Závislost generovaného výkonu na l_c a m_z – horní pohled

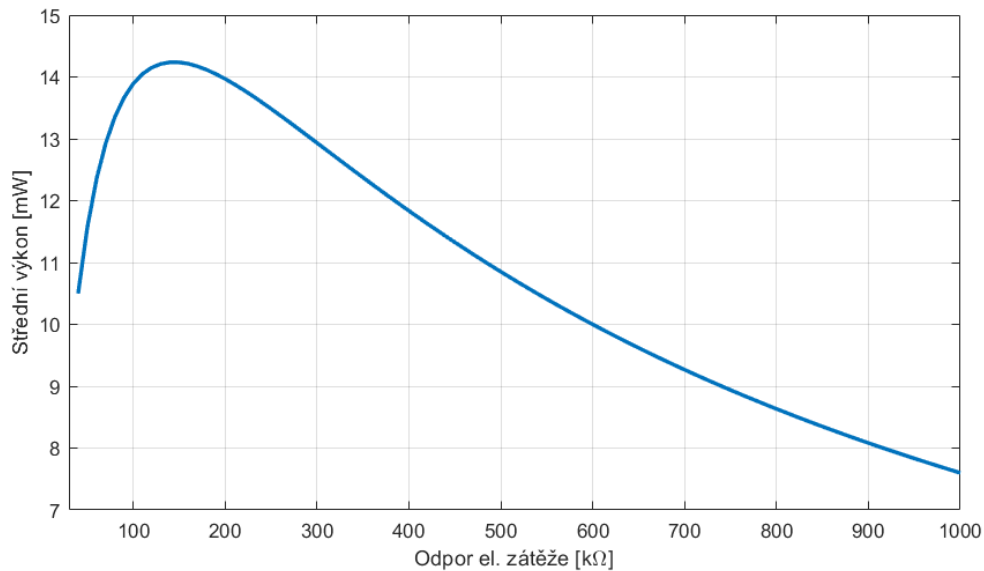
U šířky nemá průběh tak ostrý vrchol, na rozdíl od zbylých dvou rozměrů.



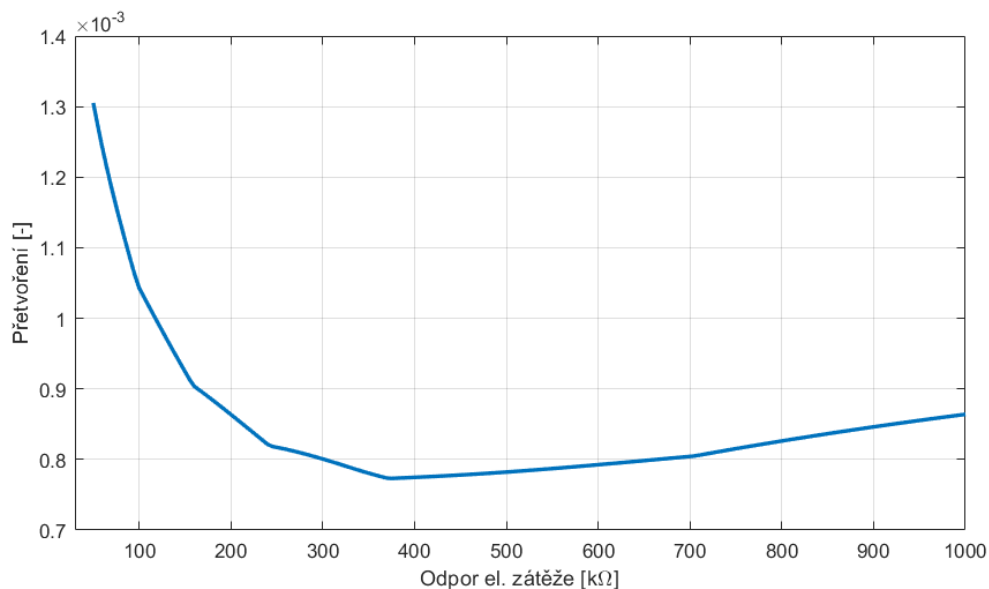
Obrázek 7.6: Závislost generovaného výkonu na w

7.3. Vliv odporu elektrické zátěže

Z analýzy vyplývá, že se z hlediska výkonu nachází optimální hodnota odporu kolem $150\text{k}\Omega$, po té klesá. Nicméně, po bližším přezkoumání bylo zjištěno, že tato hodnota odporu má z hlediska účelové funkce horší ohodnocení než nalezený výsledek ($R_l = 307,87\text{k}\Omega$). To je způsobeno tím, že došlo k překročení dovoleného rozmezí přetvoření a byla uplatněna penalizace funkce. $R_l = 307,87\text{k}\Omega$ je tedy hodnotou, která zajišťuje nejvyšší výkon při dodržení meze dovoleného přetvoření.



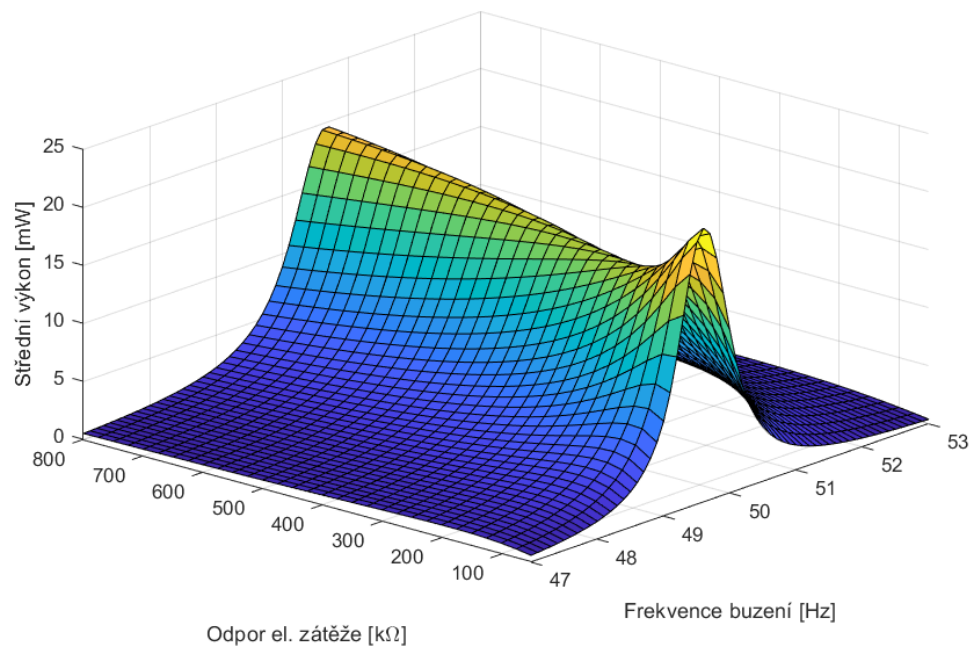
Obrázek 7.7: Závislost generovaného výkonu na R_l



Obrázek 7.8: Závislost maximálního přetvoření na R_l

7. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

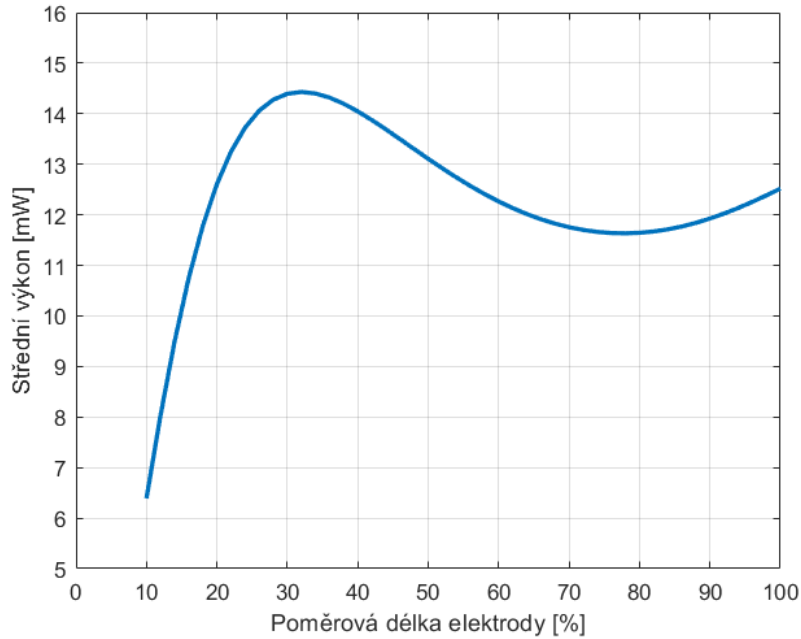
Na grafu z obr. 7.9 je dále možné vidět jakým způsobem ovlivňuje vlastní frekvenci. S rostoucím odporem se do určité hodnoty posouvá nahoru i vlastní frekvence, potom se ustálí na konstantní hodnotě.



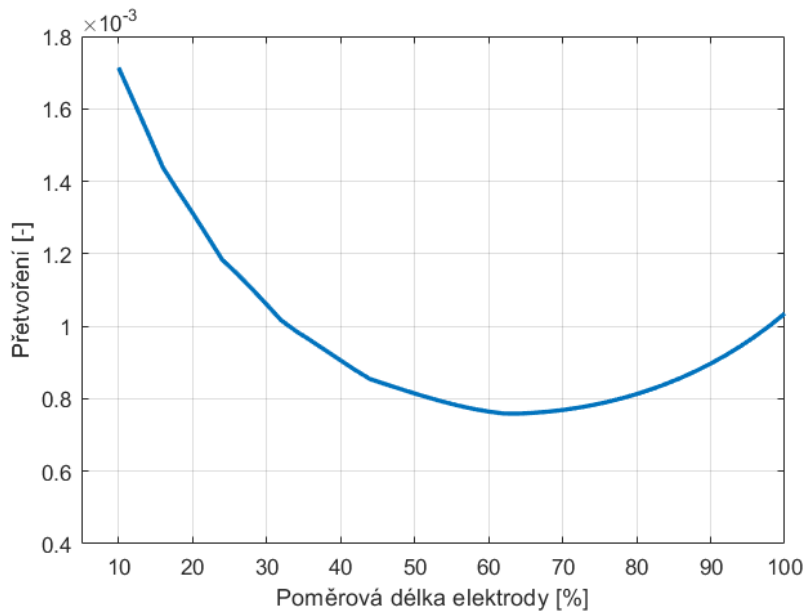
Obrázek 7.9: Závislost generovaného výkonu na R_l a frekvenci buzení

7.4. Vliv délky elektrody

Pozice maxima podle grafu je přibližně při 32%. Výsledek z optimalizace se značně liší $p_{le} = 52,84\%$. Jak je možné pozorovat na obr. 7.11, je to opět způsobené překročením hranice S_{crit} a penalizací podobně jako v případě odporu.



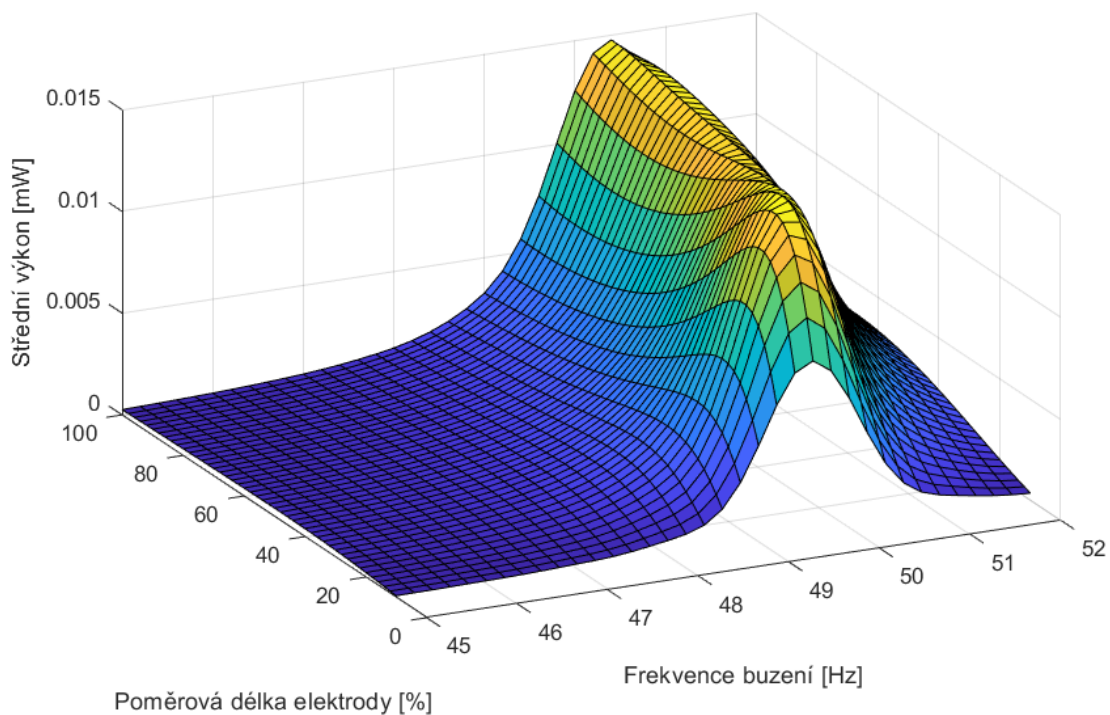
Obrázek 7.10: Závislost generovaného výkonu na p_{le}



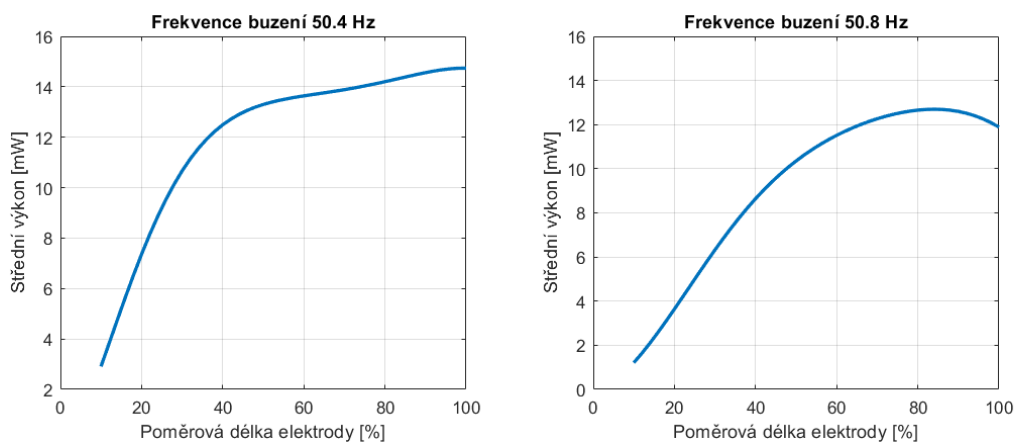
Obrázek 7.11: Závislost Přetvoření na p_{le}

7. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Po detailnějším prozkoumání bylo navíc zjištěno, že průběh závislosti výkonu na p_{le} je proměnlivý s měnící se frekvencí vstupu (obr. 7.12). I rozdíl v desetínách Hertzů může mít zásadní vliv na tvar průběhu (obr. 7.13).



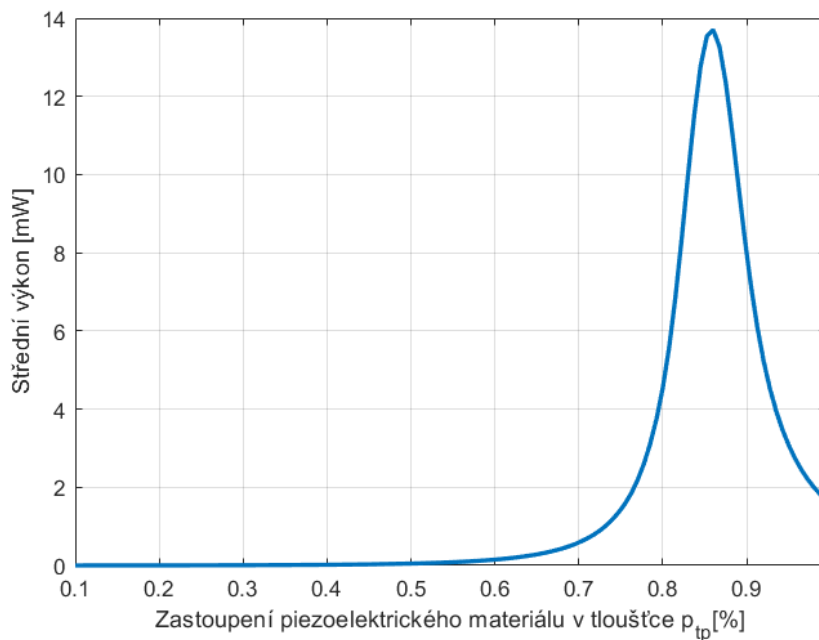
Obrázek 7.12: Závislost generovaného výkonu na p_{le} a frekvenci buzení



Obrázek 7.13: Závislost generovaného výkonu na p_{le} pro různé frekvence buzení

7.5. Vliv tloušťky piezovrstvy

Podobně jako u ostatních rozměrových veličin i zde se nachází jedno vrchol a přibližně se shoduje s nalezeným výsledkem $p_{tp} = 87,14\%$. V použitém modelu p_{tp} , narozdíl od p_{le} , ovlivňuje zastoupení materiálů a s tím spojenou tuhost nosníku.



Obrázek 7.14: Závislost generovaného výkonu na p_{tp}

Na konec je potřeba upozornit, že vykreslené průběhy funkcí platí pro konkrétní konfiguraci, nikoliv univerzálně. Závislosti na jednotlivých veličinách mohou mít společný tvar. Hodnoty a měřítko se nemusí shodovat, to platí i pro poměrové parametry.

8. Optimalizace na reálné vibrace

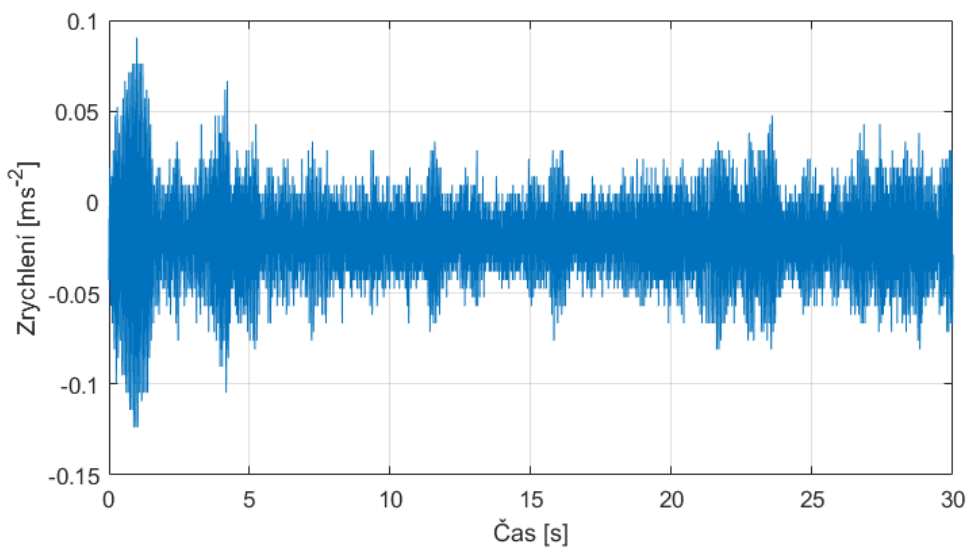
V této kapitole bude provedena optimalizace parametrů modelů na reálné naměřené vibrace. Vstupní data byla vybrána s ohledem na možné aplikace vibračního generátoru. Pro účely optimalizace byl z každého signálu použit úsek o délce 30s.

První ze signálu představuje kmitání na mostě, kde se nabízí uplatnění vibračního generátoru pro bezdrátové napájení senzorů. Druhý signál pochází z měření na lidském těle a bude sloužit k ověření výkonu pro možné aplikace pro nositelnou elektroniku. Vlastní měření nebylo součástí práce. Data použita v této kapitole jsou veřejně dostupná ke stažení z [3].

Pro porovnání výsledku bude sloužit model s parametry komerčně dostupného piezoelektrického generátoru V21BL, u kterého bude také použita optimalizace, ale pouze pro veličiny m_z a R_l .

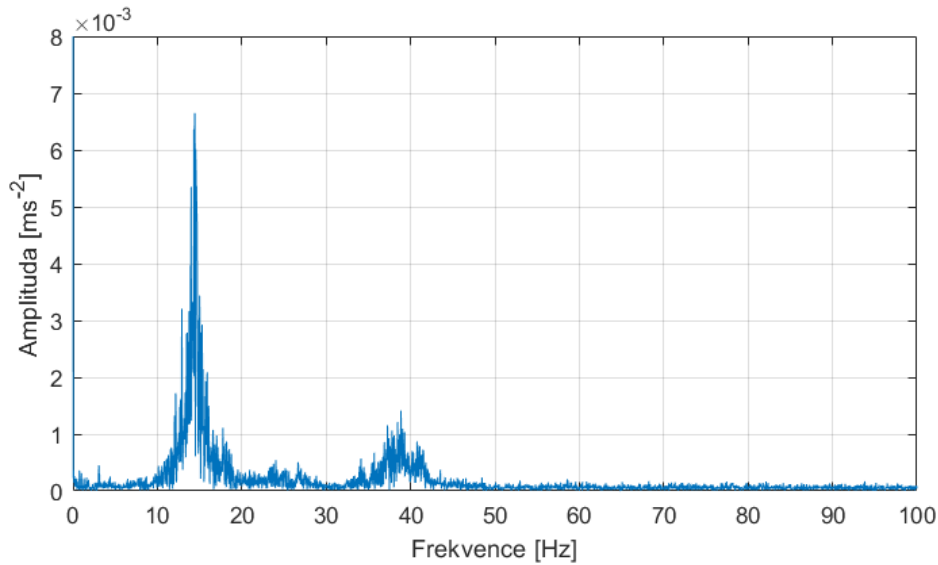
8.1. Vibrace mostu

Pro optimalizaci na vibrace z mostu byla použita data z [20]. Měřící zařízení bylo připevněno na jedno z vertikálních lan v prostřední části visutého mostu. Měření probíhalo za běžného dopravního provozu a data jsou značně ovlivněna i projíždějícími auty.



Obrázek 8.1: Vibrace mostu v čase

8.1. VIBRACE MOSTU



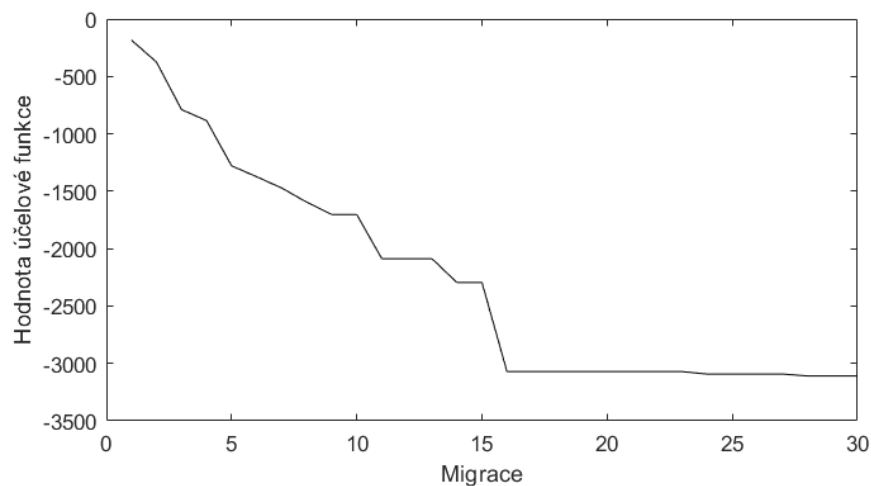
Obrázek 8.2: Vibrace mostu ve frekvenční oblasti

Při pohledu na signál ve frekvenční oblasti bylo zjištěno, že dominantní frekvence vibrací se pohybuje kolem hodnoty $14,4\text{Hz}$. V případě optimalizovaného nosníku se dá říci, že došlo k naladění vzhledem k frekvenci úspěšně. Nalezené parametry vytváří soustavu, která kmitá na frekvenci $f = 14,31\text{Hz}$. Z analýzy výsledků se dá usoudit, že podkladem pro maximální výkon je přesné frekvenční naladění a využití celého rozsahu dovoleného přetvoření. Při podobných rozměrech i hmotnosti dokáže optimalizovaný nosník poskytovat výkon o dva řády vyšší než V21BL.

U modelu s parametry komerčního přípravku se v daném rozsahu hmotnosti na dominantní frekvenci signálu naladit nepodařilo. Jako nejlepší varianta byla algoritmem objevena frekvence $37,63\text{Hz}$, ta odpovídá dalšímu významnému vrcholu z amplitudo-frekvenční charakteristiky 8.2. Protože byly modely optimalizovány na různé složky signálu, je srovnání výkonů v tomto případě nerelevantní. Všechny výsledky zahrnuté v tab. 8.1. Hodnoty zvýrazněné šedou barvou jsou konstantní, neoptimalizované a získané z datasheetu V21BL [9].

Tabulka 8.1: Výsledky optimalizace na vibrace mostu

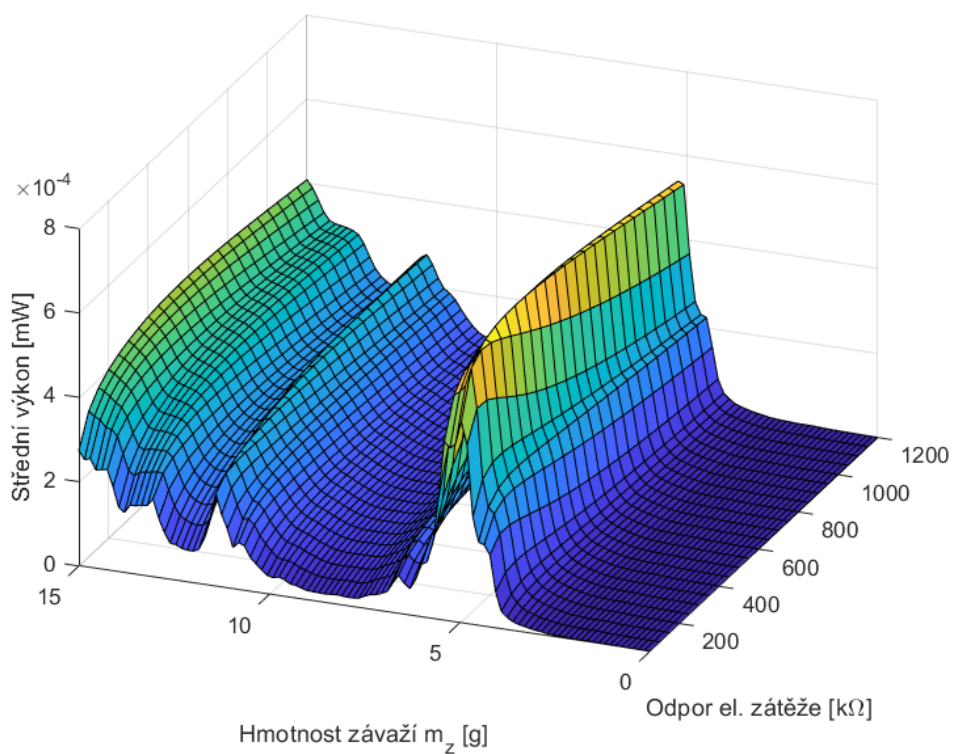
Parametry	Hodnoty		Jednotky
	Optimalizovaný	V21BL	
Vlastní frekvence f	14,31	37,63	Hz
Přidaná hmotnost m_z	12,26	5,10	g
Odpor zátěže R_z	607,73	363,72	$k\Omega$
Celková délka l_c	59,08	55,40	mm
Poměrová délka elektrody p_{le}	77,83	64,20	$\%$
Celková tloušťka t_c	0,64	0,78	mm
Poměrová tloušťka piezovrstvy p_{tp}	68,99	77,00	$\%$
Šířka w	11,08	14,5	mm
Přetvoření S_{max}	$7,88 \times 10^{-4}$	$0,44 \times 10^{-4}$	–
Střední výkon P_s	$4,37 \times 10^{-2}$	$6,19 \times 10^{-4}$	mW



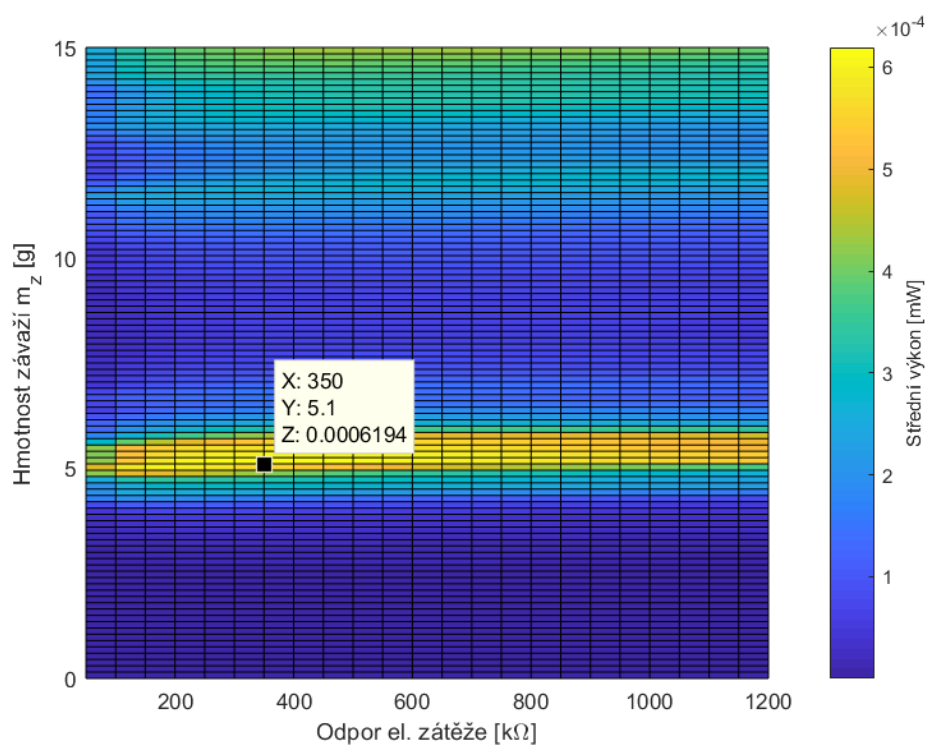
Obrázek 8.3: Vývoj hodnoty účelové funkce

Jelikož je optimalizace parametrů přípravku V21BL pouze dvoudimenzionální záležitostí snadno se dá ověřit správnost nalezeného výsledku. Vykreslením průběhu výkonu v závislosti na m_z a R_l (obr. 8.4 a 8.5) můžeme skutečně vidět, že se maximum nalézá kolem polohy $[5, 1g; 350k\Omega]$. Dále s rostoucí hmotností dochází k oblastnímu poklesu výkonu a následujícím opětovným růstem.

8.1. VIBRACE MOSTU



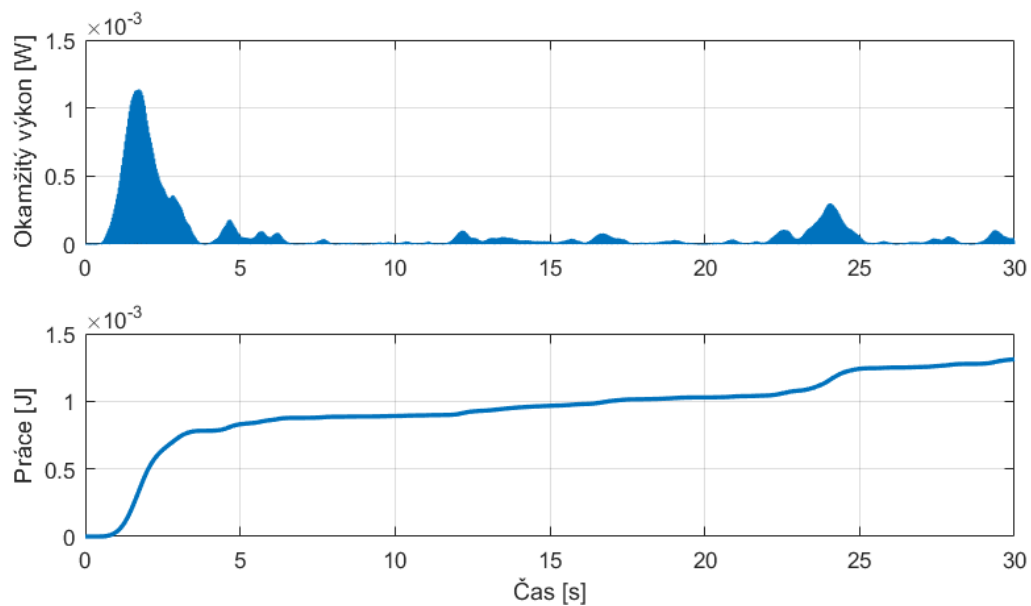
Obrázek 8.4: Výkon V21BL v závislosti na m_z a R_l



Obrázek 8.5: Výkon V21BL v závislosti na m_z a R_l - horní pohled

8. OPTIMALIZACE NA REÁLNÉ VIBRACE

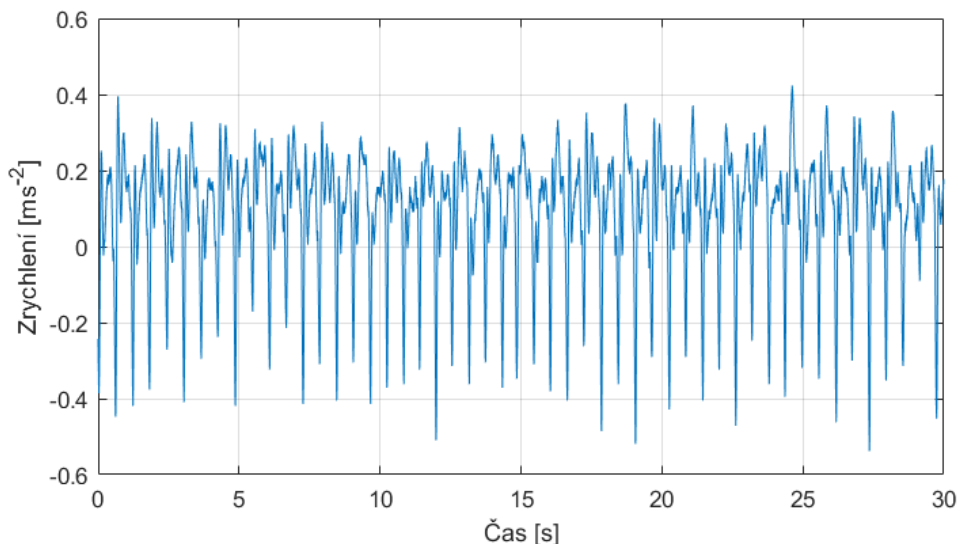
Při pohledu na obr. 8.6 bylo zjištěno, že většina vyprodukované energie pochází z prvních 4s kmitání. V tomto čase se pohybovaly amplitudy zrychlení nejvýše a přetvoření dosahovala maximálních hodnot. Mohlo dojít k rozkmitání měřené součásti vlivem projíždějících aut nebo i větru. Předpokládá se, že tento časový úsek měl největší vliv na proces optimalizace a jeho výsledek.



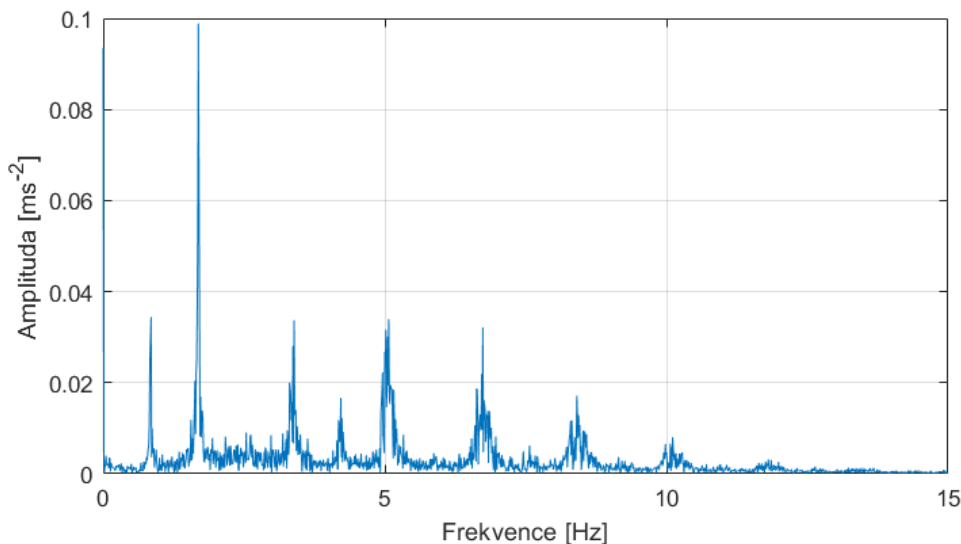
Obrázek 8.6: Vygenerovaný výkon a energie z vibrací mostu

8.2. Pohyb člověka

K prozkoumání možnosti získávání energie z lidského pohybu budou využita data o zrychlení z oblasti zápěstí. Soubor dat z [19] se skládá ze tří částí. Jednotlivé části vznikly snímáním informací z různých druhů pohybu. V první části je snímáno zrychlení při pomalé chůzi (rychlost $1,5\text{ km/h}$), v druhé běžná chůze ($3,5\text{ km/h}$) a poslední část měří pomalý běh ($6,5\text{ km/h}$). Dodržení rychlostí bylo dosaženo tím, že měření probíhalo při pohybu na běžeckém pásu. K účelům optimalizace bude využita druhá část signálu, ta z běžné chůze.



Obrázek 8.7: Zrychlení na zápěstí při chůzi v čase



Obrázek 8.8: Zrychlení na zápěstí při chůzi ve frekvenční oblasti

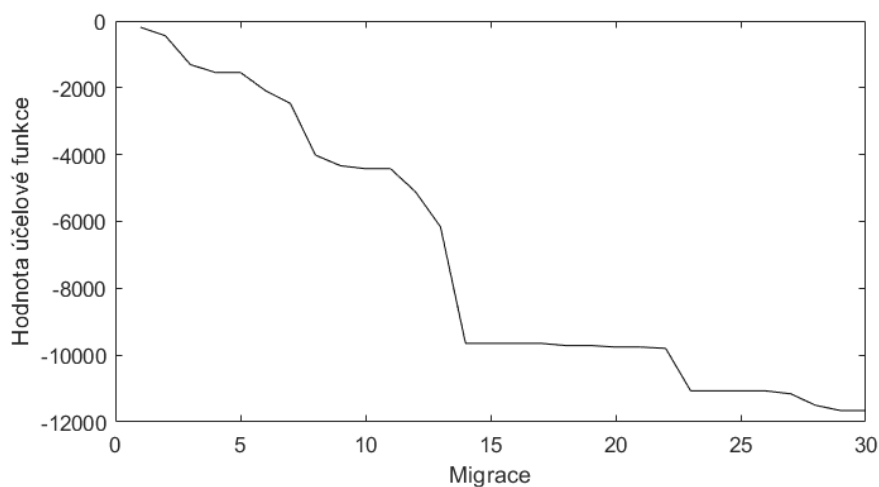
Z frekvenční analýzy signálu chůze vyplývá, že dominantní frekvence okolo $1,7\text{ Hz}$. To je mnohem méně než jsou schopné běžně vyráběné generátory dosáhnout. Na tak nízkou

8. OPTIMALIZACE NA REÁLNÉ VIBRACE

frekvenci se nepodařilo v rámci omezení ani optimalizovaný model. Přesto, jak je možné vidět v tab. 8.2, optimalizovaný nosník dokáže poskytovat o tři řády vyšší výkon.

Tabulka 8.2: Výsledky optimalizace na chůzi

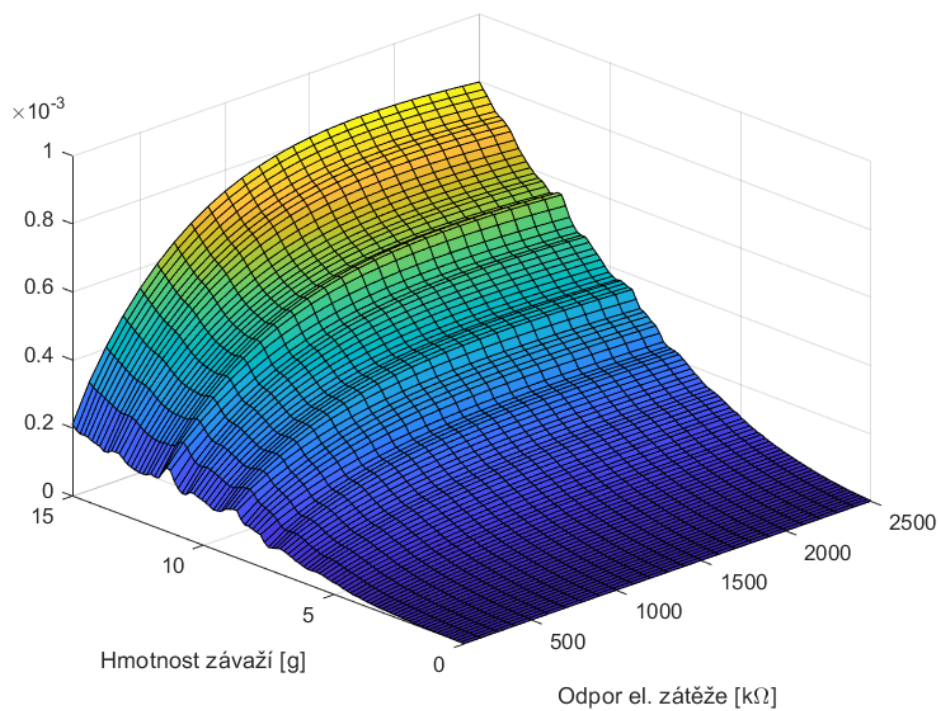
Parametry	Hodnoty		Jednotky
	Optimalizovaný	V21BL	
Vlastní frekvence f	8,13	22,98	Hz
Přidaná hmotnost m_z	13,60	15,00	g
Odpor zátěže R_z	779,16	1779,75	$k\Omega$
Celková délka l_c	97,52	55,40	mm
Poměrová délka elektrody p_{le}	53,03	64,20	%
Celková tloušťka t_c	0,66	0,78	mm
Poměrová tloušťka piezovrstvy p_{tp}	84,14	77,00	%
Šířka w	16,47	14,5	mm
Přetvoření S_{max}	$7,88 \times 10^{-4}$	$1,23 \times 10^{-4}$	–
Střední výkon P_s	0,41	$8,19 \times 10^{-4}$	mW



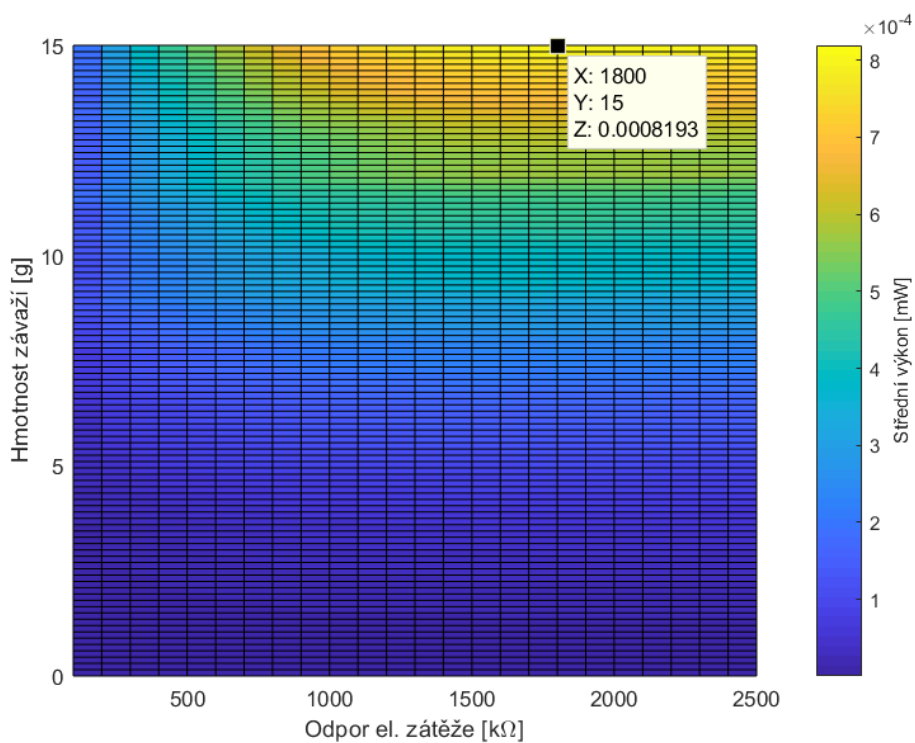
Obrázek 8.9: Vývoj hodnoty účelové funkce

Správnost parametrů je opět možné ověřit vykreslením průběhu výkonu v závislosti na m_z a R_l . Podle obr. 8.10 a 8.11 se optimální výkon nachází kolem polohy $[15g; 1800k\Omega]$. Byla využita maximální hodnota pro hmotnosti závaží, tím byla naladěna také minimální možná frekvence pro V21BL.

8.2. POHYB ČLOVĚKA



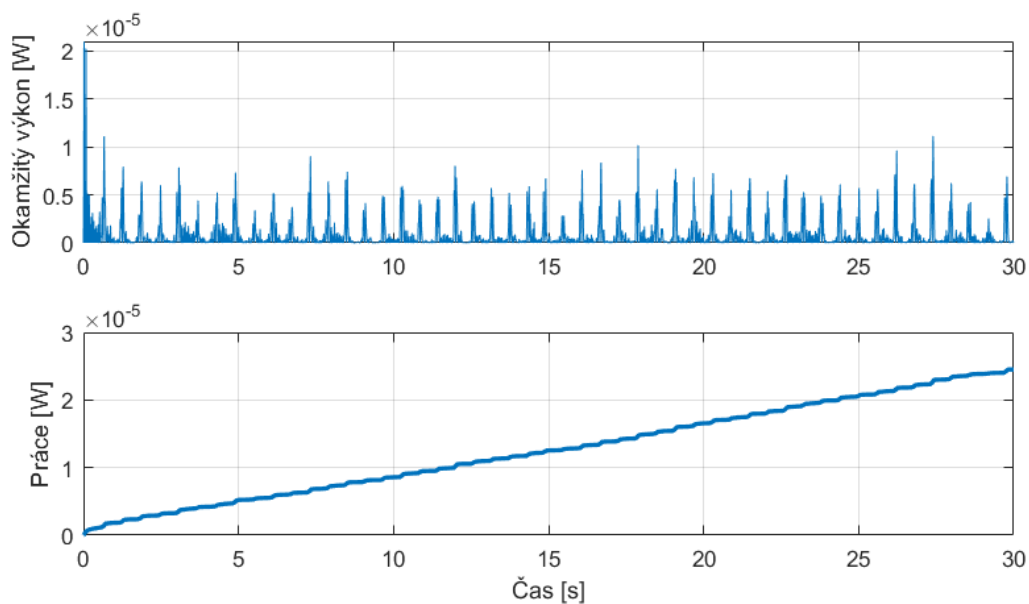
Obrázek 8.10: Výkon V21BL v závislosti na m_z a R_l



Obrázek 8.11: Výkon V21BL v závislosti na m_z a R_l - horní pohled

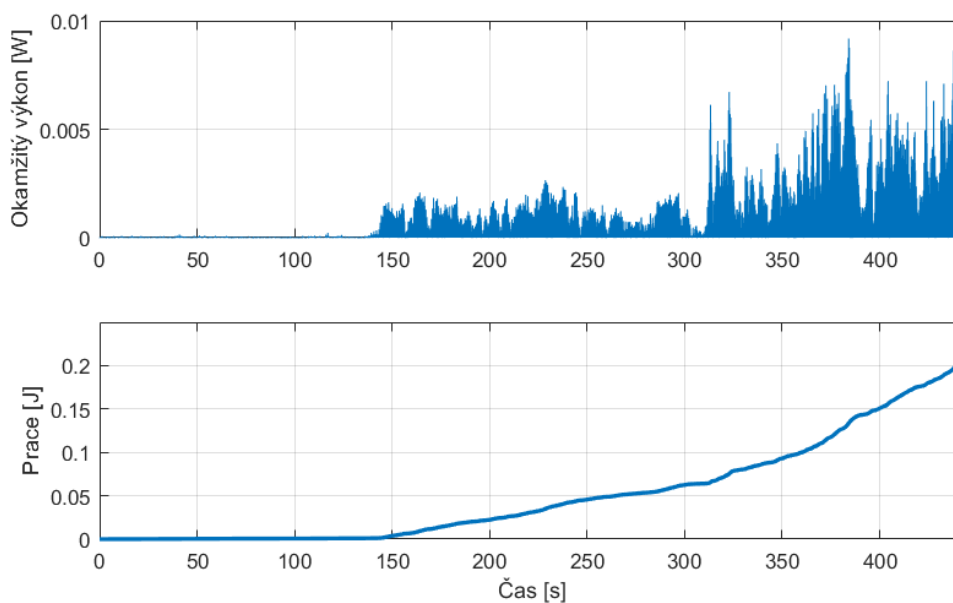
8. OPTIMALIZACE NA REÁLNÉ VIBRACE

Jelikož byla během měření dodržena téměř konstantní rychlost chůze, přírůstky generované energie se zdají z pravidelné. Jenomže přirozený lidský pohyb nebývá vždy tak pravidelný. Pro zajímavost bylo otestováno chování optimalizovaného generátoru na různých rychlostech chození, jejíž data jsou k dispozici v použitém souboru.



Obrázek 8.12: Vygenerovaný výkon a energie z chůze

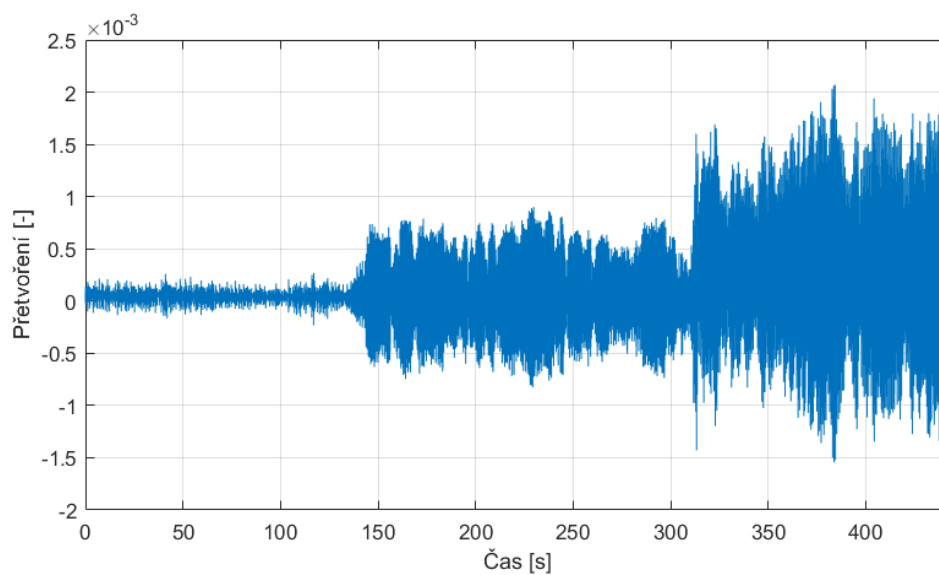
Při pohledu na obr. 8.13 a 8.14 je na první pohled zjevné, že je signál složen ze tří úseků. První úsek se nachází v časovém intervalu do 138 s a reprezentuje chování generátoru na pomalou chůzi ($1,5 \text{ km/h}$). Generovaný výkon a energie z této oblasti je v porovnání s ostatními úseky téměř nulová.



Obrázek 8.13: Vygenerovaný výkon a energie z chůze

8.2. POHYB ČLOVĚKA

Data z prostředního úseku (běžná chůze) byla použita pro optimalizaci. Třetí úsek (od 308s) představuje chování při pomalém běhu o rychlosti $6,5 \text{ km/h}$ („jogging“). Sklon příbytku energie je v této oblasti nejvyšší, avšak přetvoření daleko přesahují dovolenou mez (obr.8.14).



Obrázek 8.14: Průběh přetvoření

Jak se dalo předpokládat, optimalizace představuje účinný nástroj pro zvyšování získávané energie, může ovšem vést na úzkou specializaci na použitý vstup.

9. Závěr

Hlavní i dílčí cíle byly splněny. Z úvodu práce byla rozebrána problematika úlohy optimalizace a možnosti jejího řešení. Čtenář se postupem seznamuje s konkrétními metodami zejména ze skupiny evolučních algoritmů. Ty jsou proslulé svými vlastnostmi řešit problémy, které by byly jinými způsoby neřešitelné nebo řešitelné jen velmi obtížně.

V dalších kapitolách byl popsán model piezoelektrického generátoru. Na základě analytického popisu byl sestaven model v prostředí Simulink. Ten posloužil k získání průběhu výkonu a přetvoření potřebných pro vyhodnocení účelové funkce. Pro pochopení vlivů jednotlivých parametrů generátoru byla provedena citlivostní analýza.

Algoritmus SOMA byl poté úspěšně implementován pro nalezení konstrukčních a elektrických parametrů generátoru, při kterých by produkoval největší výkon při nejmenších rozměrech.

Série pokusů o optimalizaci potvrdily, že přestože je SOMA účinným nástrojem v tomto oboru, ne vždycky se algoritmu podařilo nalézt globální extrém. Částečným řešením je přenastavení parametrů algoritmů tak, aby prohledával stavový prostor podrobněji. Cenou ovšem bude navýšení časové náročnosti a nalezení globálního extrému nebude zaručeno nikdy.

Z výsledků optimalizace vyplývá, že na maximalizaci výkonu se podílí převážně dva klíčové faktory. Aby byla vlastní frekvence v rezonanci s některou z dominantních složek signálu buzení. A zároveň aby byla tuhost a tlumení byly takové aby umožnily nosníku využít maximum z dovoleného rozpětí výchylky. Z tohoto důvodu by měla být volba mezní hodnoty přetvoření pečlivě uvážena aby nedošlo k poruše materiálu.

Poslední a hlavní úlohou byla optimalizace nosníku na reálné vibrace. Jako vstupní signály byla použita veřejně dostupná data. První z nich představovala vibrace mostu. V tomto případě nalezený výsledek vytvořil nosník přesně naladěný na dominantní frekvenci vibrací a zároveň se velikost maximálního přetvoření pohybuje na hranici maximální dovolené hodnoty. Lze tedy předpokládat, že výsledek je skutečně globálním extrémem.

Na dominantní signál chůze se nepodařilo naladit, přesto byl optimalizovaný nosník schopen dodat výkon o tři řády vyšší než model V21BL. Možným vysvětlením je, že mohla být algoritmem nalezena jiná významná frekvence.

Dá se říci, že výkonnou část, tedy samotné hledání optima, zvládá algoritmus minimálně s uspokojivými výsledky. Lidský podíl však stále představuje neméně důležitou součást procesu – určení toho, co se má optimalizovat. To zahrnuje především správnou definici účelové funkce a volba reprezentativního vzorku vstupních signálů. Na těchto elementech závisí to, jestli bude algoritmus hledat to, co je skutečně požadováno.

Použití evolučních algoritmů by mohlo hrát důležitou roli i v rámci průmyslu 4.0, který si, mimo jiné, klade za cíl automatizaci výroby na míru. V ideálním scénáři by mohl mít celý proces návrhu na starost počítač a po lidské obsluze by bylo požadováno jen vložení vstupních dat. V kombinaci s flexibilní výrobou by mohlo být umožněno piezoelektrickým generátorům k rozšíření pro praktické užití.

Literatura

- [1] BACK, Thomas. *Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms*. New York: Oxford University Press, 1996. ISBN 01-950-9971-0.
- [2] DAVENDRA, Donald, Ivan ZELINKA, Magdalena BIALIC-DAVENDRA, Roman SENKERIK a Roman JASEK. *Discrete Self-Organising Migrating Algorithm for flow-shop scheduling with no-wait makespan*. Mathematical and Computer Modelling [online]. 2013, 57(1-2), 100-110 [cit. 2018-03-08]. DOI: 10.1016/j.mcm.2011.05.029. ISSN 08957177. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717711002998>
- [3] Energy Harvesting Network [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://eh-network.org/data/index.php>
- [4] ERTURK, Alper, 2009. *Electromechanical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters*. B.m. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [5] KUNDU, Sushanta a Harshal B. NEMADE. *Modeling and Simulation of a Piezoelectric Vibration Energy Harvester*. Procedia Engineering. 2016, 144, 568-575. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.05.043. ISSN 18777058. Dostupné také z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816302582>
- [6] LÁN, Radek. *Modelování a verifikace piezoelektrického generátoru*. [Diplomová práce.] Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
- [7] MAŘÍK, V., O. Štěpánková, J. Lažanský a kolektiv: *Umělá inteligence (3)*, Academia, Praha, 2001. Academia, Praha, 2001.
- [8] Midé. *PPA Products: Datasheet & User Manual* [online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <http://info.mide.com/hubfs/ppa-piezo-product-datasheet.pdf?hsCtaTracking=b40269b7-eb42-4234-a7ae-d6b9bfa6f122%7C8b655dfb-a489-4b33-9a15-e1c5c381bb78>
- [9] Midé. *Vulture Datasheet* [online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/606/mide%20technology_vulture_datasheet_001-1214898.pdf
- [10] ERHART, Jiří. *Piezoelektrina a feroelektrina: Jevy a jejich vlastnosti* [online]. Technická univerzita v Liberci [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/1057/mod_resource/content/5/FPM_Piezo_prednaska1.pdf
- [11] NĚMEC, Jan. *Efektivita evolučních algoritmů* [Diplomová práce.] Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 64 s. Vedoucí práce Ing. Radek Fujdiak

- [12] PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER VOLTURE™ V21BL. In: *Direct Industry* [online]. 2018 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/mide-technology-corp/product-127155-1571782.html>
- [13] *Průběh funkce: Studijní text.* [online]. Brno: FSI VUT v Brně [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: <http://mathonline.fme.vutbr.cz/Matematika-I/sc-5-sr-1-a-4/default.aspx>
- [14] ROUNDY, S. a P. K. WRIGHT. *A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics.* Smart Materials and Structures. 2004, 13(5), 1131-1142. DOI: 10.1088/0964-1726/13/5/018. ISSN 0964-1726. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/0964-1726/13/i=5/a=018?key=crossref.8cb539ef2c04efdc61df2fae9dc8e48c>
- [15] STRUTT, J. W. *The Theory of Sound.* London, UK: MacMillan Company, 1894.
- [16] TICHY, Jan, Jiří ERHART, Erwin KITTINGER a Jana PŘÍVRATSKÁ. *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials.* New York: Springer, 2010. ISBN 978-3-540-43966-0.
- [17] TVRDÍK, Josef. *Stochastické algoritmy pro globální optimalizaci* [online]. Ostravská univerzita v Ostravě, 2010 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <http://www1.osu.cz/~bujok/files/stago.pdf>
- [18] Utilizing Piezoelectricity and Photovoltaics to Increase Hybrid Car Efficiency [online]. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://dev.nsta.org/evwebs/2014102/news/default.html>
- [19] Vibration Data: Human Motion - Wrist. *Next Generation Energy-Harvesting Electronics: Holistic Approach* [online]. University of Bristol/University of Southampton [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.holistic.ecs.soton.ac.uk/data/human_wrist/data.php
- [20] Vibration Data: Suspension Bridge Location 06. *Next Generation Energy-Harvesting Electronics: Holistic Approach* [online]. University of Bristol/University of Southampton [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.holistic.ecs.soton.ac.uk/data/suspension_06/data.php
- [21] VRBKA, Jan. *Pružnost a pevnost I: Učební text.* Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2011.
- [22] WEISE, Thomas. *Global Optimization Algorithms: Theory and Application* [online]. 3rd edition. 2011 [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <http://www.it-weise.de/projects/bookNew.pdf>
- [23] ZELINKA, Ivan. *SOMA Homepage* [online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <http://www.fai.utb.cz/people/zelinka/soma/>
- [24] ZELINKA, Ivan. *Umělá inteligence: v problémech globální optimalizace.* Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-730-0069-5.

Seznam použitých zkratek a symbolů

ε_{33}	absolutní permitivita
θ	převodní elektromechanická konstanta
a	konstanta reprezentující způsob zapojení
b	vzdálenost středu piezovrstvy od neutrální čáry
b_m	mechanické tlumení
C_p	ekvivalentní kapacita
d_{31}	piezoelektrická nábojová konstanta
F	síla
I	kvadratický moment
k	tuhost
k_s	převodní konstanta mezi výchylkou a středním přetvořením
k_{max}	převodní konstanta mezi výchylkou a maximálním přetvořením
l_c	délka nosníku
l_e	délka elektrody
l_m	délka závaží
m	celková ekvivalentní hmotnost
m_0	ekvivalentní hmotnost nosníku
m_r	reálná hmotnost nosníku
m_z	hmotnost závaží
$M(x)$	moment síly
N_{eval}	počet vyhodnocení účelové funkce
p_{le}	poměrová délka elektrody
p_{tp}	poměrová zastoupení piezoelektrického materiálu v tloušťce
P_s	střední generovaný výkon
PRT	perturbance
R_l	odpor elektrické zátěže
S_{crit}	střední přetvoření

S_{max}	maximální přetvoření
$SOMA$	SamoOrganizující se Migrační Algoritmus
t_c	tloušťka nosníku
t_f	konečný čas simulace
t_p	tloušťka vrstvy piezomateriálu
u	elektrické napětí
V_c	celkový objem nosníku
$V21BL$	typ komerčně vyráběného přípravku
w	šířka nosníku
x	vzdálenost od základny
\ddot{y}	zrychlení základny
Y	Youngův modul pružnosti nosníku
Y_p	Youngův modul pružnosti piezomateriálu
Y_s	Youngův modul pružnosti výplňového materiálu
z	výchylka na konci nosníku
z_{max}	maximální výchylka

Seznam obrázků

3.1	Globální minimum [17]	14
3.2	Seznam jednotlivých algoritmů a jejich možné zařazení	16
4.1	Průběh evolučních algoritmů	17
4.2	Schwefelova funkce – často využívaná pro testování optimalizačních metod nebo demonstraci jejich výkonu [17]	18
4.3	Konvergence populace evolučního algoritmu na Schwefelově funkci [24]	18
4.4	Jednobodové křížení [11]	19
4.5	Vliv řídicích parametrů na chování jedinců [2]	21
5.1	Vznik náboje v krystalu piezoelektrické látky [18]	23
5.2	Piezoelektrický generátor – Midé V21BL [12]	23
5.3	Schéma náhradního obvodu	24
5.4	Model v prostředí simulink	24
5.5	Schéma nosníku	26
5.6	a) paralelní zapojení, b) sériové zapojení elektrod [5]	26
7.1	Závislost generovaného výkonu na m_z	34
7.2	Závislost generovaného výkonu na m_z a frekvenci buzení	35
7.3	Závislost generovaného výkonu na l_c	35
7.4	Závislost generovaného výkonu na l_c a m_z	36
7.5	Závislost generovaného výkonu na l_c a m_z – horní pohled	36
7.6	Závislost generovaného výkonu na w	37
7.7	Závislost generovaného výkonu na R_l	38
7.8	Závislost maximálního přetvoření na R_l	38
7.9	Závislost generovaného výkonu na R_l a frekvenci buzení	39
7.10	Závislost generovaného výkonu na p_{le}	40
7.11	Závislost Přetvoření na p_{le}	40
7.12	Závislost generovaného výkonu na p_{le} a frekvenci buzení	41
7.13	Závislost generovaného výkonu na p_{le} pro různé frekvence buzení	41
7.14	Závislost generovaného výkonu na p_{tp}	42
8.1	Vibrace mostu v čase	43
8.2	Vibrace mostu ve frekvenční oblasti	44
8.3	Vývoj hodnoty účelové funkce	45
8.4	Výkon V21BL v závislosti na m_z a R_l	46
8.5	Výkon V21BL v závislosti na m_z a R_l - horní pohled	46
8.6	Vygenerovaný výkon a energie z vibrací mostu	47
8.7	Zrychlení na zápěstí při chůzi v čase	48
8.8	Zrychlení na zápěstí při chůzi ve frekvenční oblasti	48
8.9	Vývoj hodnoty účelové funkce	49
8.10	Výkon V21BL v závislosti na m_z a R_l	50
8.11	Výkon V21BL v závislosti na m_z a R_l - horní pohled	50
8.12	Vygenerovaný výkon a energie z chůze	51
8.13	Vygenerovaný výkon a energie z chůze	51
8.14	Průběh přetvoření	52

Seznam tabulek

5.1	Seznam řídicích veličin	25
6.1	Parametry algoritmu	29
6.2	Rozsah argumentů	30
6.3	Výsledky optimalizace na buzení s různou amplitudou	32
6.4	Výsledky optimalizace na buzení s různou frekvencí	33
8.1	Výsledky optimalizace na vibrace mostu	45
8.2	Výsledky optimalizace na chůzi	49

Seznam příloh

DPpřilohy_Thank.zip – archív komprimovaných souborů