



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

NÁVRH MALÉHO VIBRAČNÍHO BUDIČE

DESIGN OF A SMALL VIBRATION EXCITER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Václav Palík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Rostislav Huzlák, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Václav Palík
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.
Akademický rok:	2020/21

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 bakalářské práce:

Návrh malého vibračního budiče

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Předmětem práce je návrh malého vibračního budiče s elektromagnetickým buzením. Student se nejprve seznámí s postupem jednotlivými body návrhu a poté provede celkový návrh. Navržený budič poté ověří pomocí simulace v programu Matlab/Simulink.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše na téma malé vibrační budiče.

Návrh elektro-magnetické části budiče.

Návrh mechanické části budiče.

Vyhodnocení možností využití navrženého budiče.

Seznam doporučené literatury:

FITZGERALD, A. E., Charles KINGSLEY a Stephen D. UMANS. *Electric machinery*. 6th ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, 2003. ISBN 978-80-01-06097-1.

MAYER, Daniel a Bohuš ULRYCH. *Elektromagnetické aktuátory*. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-216-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

.....
Prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

ředitel ústavu

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

děkan fakulty

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je návrh malého vibračního budiče. Rešeršní část se věnuje prozkoumání trhu a dostupnosti různých budičů. Dále se práce zvláště zabývá návrhem elektro-magnetické i mechanické částí budiče. Návrh budiče je zhodnocen a jsou rozvinuty možnosti jeho využití.

Summary

The goal of this bachelor's thesis is to design a small vibration exciter. The research part is devoted to researching the market and the availability of different exciters. Furthermore, the work deals separately with the design of electro-magnetic and mechanical parts of the exciter. The design of the exciter is valorised, and the possibilities of its use are evaluated.

Klíčová slova

Malý vibrační budič, Návrh budiče, Model vibračního budiče

Key words

Small vibration exciter, Exciter design, Vibration exciter model

Bibliografická citace

PALÍK, Václav. *Návrh malého vibračního budiče* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-10]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132832>.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Rostislav Huzlík.

Prohlašuji, že jsem tuto práci napsal sám, pouze na základě vlastní práce, připomínek mého vedoucího a níže citovaných zdrojů.

Václav Palík

Děkuji všem, kteří mi při vytváření této práce pomohli drobnou věcnou radou, doporučením i podporou. Konkrétní díky patří Ing. Rostislavu Huzlíkovi, Ph.D. za příkladné vedení práce a doc. Ing. Zdeňkovi Hadašovi, Ph.D. za konzultace s prací spojené.

Václav Palík

Obsah

1 Úvod	9
2 Rešerše na téma malé vibrační budiče	10
2.1 Dostupné malé vibrační budiče	10
2.2 Konstrukce vibračních budičů	11
3 Návrh elektro-magnetické části budiče	13
3.1 Dynamika elektromechanických soustav	13
3.2 Rovnice elektro-magnetické části budiče	13
3.3 Rovnice magnetické síly	16
3.4 Elektro-magnetické parametry modelu	17
4 Návrh mechanické části budiče.....	18
4.1 Rovnice mechanické části budiče.....	18
4.2 Mechanické parametry modelu	19
5 Model budiče v programu Matlab/Simulink.....	22
5.1 Matlab	22
5.2 Simulink	23
6 Vyhodnocení návrhu budiče.....	24
6.1 Amplitudová frekvenční charakteristika	24
6.1.1 Amplitudová frekvenční charakteristika pro sinusový zdroj napětí	24
6.1.2 Amplitudová frekvenční charakteristika pro pulzový zdroj napětí	27
6.1.3 Závislost amplitudy na šířce pásma.....	28
6.2 Zhodnocení navržených elektrických parametrů.....	31
6.3 Vhodné aplikace navrženého budiče	39
7 Závěr	41
Seznam použitých zdrojů	42
Seznam použitých zkratek a symbolů	43
Seznam obrázků.....	45
Seznam grafů.....	45
Seznam tabulek	46
Seznam příloh	46

1 Úvod

Vibrace jsou jevem, při kterém je těleso svým pohybem vázané na určitou rovnovážnou polohu. V moderním inženýrství jsou součástí většiny procesů mechanických soustav. Doprovází chod téměř každého stroje a vzrůst produktivity s provozní rychlostí strojů s sebou přináší nežádoucí kmitání společně s ním úzce spojený nárůst hlučnosti a zvýšené namáhání součástí. (1) Ve strojírenství je z těchto důvodů mnohdy nutné zkoumat chování nejen různých zařízení ale také konstrukcí právě když jsou vystaveny kmitavému pohybu. Takové testování neboli modální analýza se v praxi provádí za využití vibračních budičů.

Vibrační budič je přístroj, který vyvolává vibrace a je schopný předávat je jiným konstrukcím nebo zařízením v závislosti na vstupním signálu. Malé předměty nebo konstrukce mohou být připevněny přímo k povrchové ploše budiče. Některé typy budičů mohou být s předměty propojeny nastavcem pro testování síly v tlaku nebo drátem pro testování síly v tahu. Struktury propojené s budiči odpovídají na buzené kmity odezvou a v určitých frekvencích mohou rezonovat. Na základě výsledků těchto měření lze vykonávat rozhodnutí při konstruování strojů, zařízení nebo konstrukcí.

Vibračních budičů existuje velká škála od velmi velkých, které se využívají ve stavebním inženýrství, přes středně velké, využívané například při konstruování karoserií, až po malé, využívané k testování malých elektronických zařízení.

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s postupem návrhu vibračního budiče s elektromagnetickým buzením, provedení rešerše trhu a navrhnutí modelu malého vibračního budiče, který bude ověřen simulacemi v programu Matlab/Simulink.

2 Rešerše na téma malé vibrační budiče

Tato kapitola se zabývá průzkumem trhu a dostupností malých vibračních budičů. Český trh není v tomto ohledu příliš velký a uvedené budiče jsou tedy výhradně od zahraničních firem. U budičů udávají výrobci a dodavatelé krom obecného shrnutí vlastností dvě zásadní informace, a to sice frequency range a displacement. Volně přeloženo do češtiny se jedná o maximální použitelnou frekvenci a výchylku, které je vibrační zařízení schopno dosáhnout.

Dále kapitola rozvíjí konstrukční možnosti při navrhování budiče a uvádí základní rozdělení budičů do tří kategorií.

2.1 Dostupné malé vibrační budiče

Modal Exciter TYPE 4824 firmy Brüel & Kjaer (2)

Kompaktní a lehký modální budič, který je ideální pro vysoce přesné, jednobodové nebo vícebodové buzení. Jeho využití se rozpíná od testování v automobilovém průmyslu a komponent hnacích ústrojí až po testování velkých konstrukcí. Jeho frekvenční škála sahá až po 5 000 Hz a maximální výchylka je 12,7 mm.

Mini-Shaker TYPE 4810 firmy Brüel & Kjaer (3)

Malý vibrační budič, který se vleze do dlaně. Je navržený pomocí technologie permanentních magnetů pro zajištění buzení. Jeho využití je vhodné pro řadu výzkumných i vzdělávacích aplikací, včetně testování strukturní odezvy, vibračního měniče a kalibrace akcelerometru. Jeho frekvenční škála sahá až po 18 000 Hz a maximální výchylka je 4 mm.

LDS V201 Permanent Magnet Shaker firmy Brüel & Kjaer (4)

Miniaturní jednotka určená k replikaci vibračního prostředí za laboratorních podmínek. Je ideální pro nejrůznější průmyslové aplikace a také široce používána na akademických a výzkumných institucích k vyšetřování dynamického chování struktur a materiálů. Jeho frekvenční škála sahá až po 13 000 Hz a maximální výchylka je 2,5 mm.

Model 2025E firmy The Modal Shop (5)

Lehký elektrodynamický modální budič malého půdorysu o hmotnosti 6 kg. Je vhodný pro strukturální testování a experimentální aplikace modální analýzy. Jeho frekvenční škála sahá až po 9 000 Hz a maximální výchylka je 18 mm.

Vibration shaker PM-20 firmy DEWESoft (6)

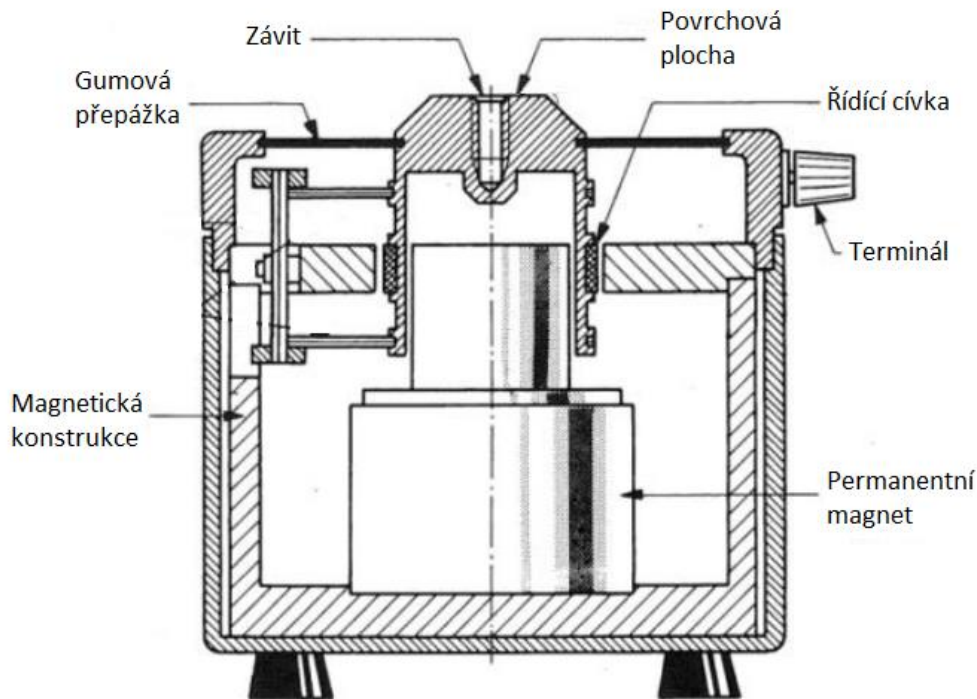
Firma DEWESoft poskytuje širší sortiment vibračních budičů. Nejmenší model z nabídky je PM-20. Budiče mají zabudované řídicí cívky, které jsou pohyblivé a změnami proudu, který jimi protéká, jsou řízeny vibrace. Frekvenční maximum modelu PM-20 je 12 000 Hz a maximální výchylka je 2,5 mm.

Rodina elektrodynamických budičů firmy The Modal Shop (7)

Firma The Modal Shop poskytuje velký výběr malých vibračních budičů, jejichž výchylky se pohybují od 2,5 po 12,5 mm. Nabízené budiče mají různé aplikace od kalibrace akcelerometrů a experimentální modální analýzy až po obecné vibrační testování malých součástí. Nejmenší nabízený budič je Model 2004E s maximální frekvencí 11 000 Hz a maximální výchylkou 2,5 mm.

2.2 Konstrukce vibračních budičů

Vibrační budiče se dělí na několik druhů podle konstrukce. Obrázek 1 zobrazuje řez elektrodynamickým budičem se stacionárně upevněným permanentním magnetem. Alternativní konstrukce může být provedena pomocí elektromagnetu. Budič s elektromagnetem má místo stacionárního magnetu pohyblivé, obvykle válcové, jádro z magnetického materiálu.



Obrázek 1: Řez budičem se stacionárním magnetem (8)

Vibrační budiče se běžně dělí do tří kategorií podle smyslu přenášení vibrací. Jedná se o budiče standartní, modální a inerciální.

Standartní budiče jsou vhodné pro provádění zkoušek při rozsáhlých frekvencích a amplitudách. Zkoušený vzorek lze připevnit přímo na vibrační povrchovou plochu, která se dá obvykle zvětšit pomocí nástavce.

Modální budiče se používají především při studiu vibračního chování konstrukcí. Na tyto budiče je přes závit namontované žihadlo, jímž je vibrační část spojena

například s karoserií auta a při zkoušce se zkoumá její výdrž při provozních podmínkách.

Poslední typ budičů, inerciální, není v oblasti použití příliš odlišný od modálních budičů. Odlišné jsou však ve způsobu propojení s testovanými konstrukcemi. Samotné tělo inerciálních budičů totiž vibruje, takže se budič přiděluje přímo na zkoumanou konstrukci. V závislosti na rozměrech konstrukce a požadované zatěžovací frekvenci může být vhodnější použít buďto inerciální nebo modální budič.

Tato práce se věnuje návrhu standartního vibračního budiče s elektromagnetem.

3 Návrh elektro-magnetické části budiče

3.1 Dynamika elektromechanických soustav

Modely elektromechanických soustav se skládají ze tří částí. První, vnější elektrická část, je tvořena rezistorem a zdrojem napětí. Ve druhé části dochází k přeměně energie z elektrické na mechanickou a nazývá se konzervativní částí. K této přeměně dochází za pomoci cívky a magnetu. Do třetí, mechanické části, jsou zahrnuty mechanické vlastnosti soustavy jako tuhost pružiny, koeficient tlumení, hmotnost pohybujícího se tělesa nebo vnější mechanická síla. Protože ale záleží na konkrétním modelu budiče, nemusí ve třetí části vystupovat všechny tyto veličiny. (9)

3.2 Rovnice elektro-magnetické části budiče

Vstupní hodnotou modelu je napětí $u(t)$. Jak už bylo zmíněno v minulé podkapitole, elektricko-magnetická část soustavy se skládá právě ze zdroje napětí a odporu. Pro napětí lze tedy zapsat rovnici:

$$u(t) = R \cdot i(t) + u_i \quad (3.2-1)$$

Vstupní napětí $u(t)$ je rovno násobku odporu R a proudu $i(t)$, ke kterému je přičteno indukované napětí u_i . Indukované napětí je přitom závislé na časové derivaci spráženého magnetického toku Ψ , takže rovnici je možné rozepsat jako:

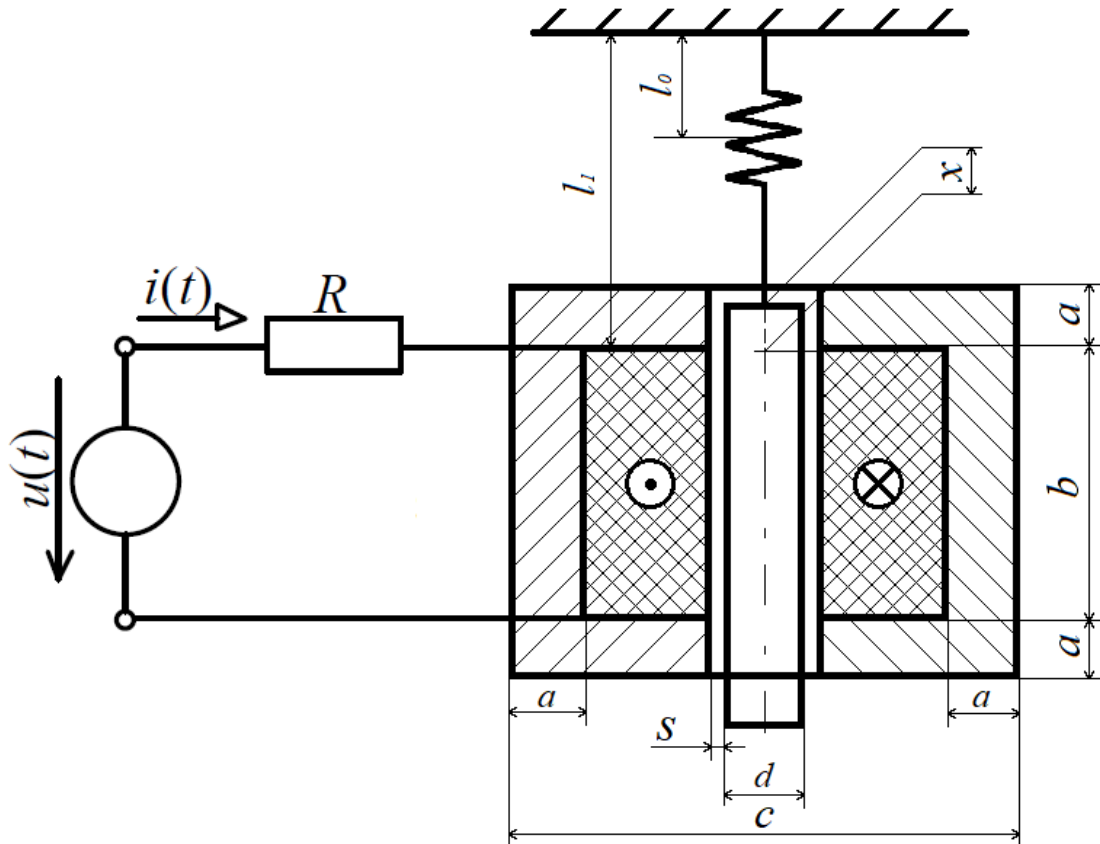
$$u(t) = R \cdot i(t) + \frac{d\Psi}{dt} \quad (3.2-2)$$

Protože sprážený magnetický tok $\Psi(x, t)$ je rovný násobku indukčnosti cívky $L(x)$ a proudu $i(t)$, rovnici 3.1-2 je možné ještě více rozepsat pomocí transformačního a pohybového napětí:

$$u(t) = R \cdot i(t) + L(x) \frac{di(t)}{dt} + i(t) \cdot \frac{\partial L(x)}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.2-3)$$

Člen $L(x) \frac{di(t)}{dt}$ představuje transformační napětí. Člen $i(t) \cdot \frac{\partial L(x)}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt}$ je pohybové napětí, které souvisí s elektromechanickou přeměnou energie. (9)

Při dalším odvozování je nutné stanovit si jasně daný model budiče, protože indukčnost cívky $L(x)$ je funkcí polohy. Vzdálenost x je vidět na obrázku 2.



Obrázek 2: Nákres budiče (10)

Pro napěťovou rovnici se nyní dá vypočítat indukčnost $L(x)$. Pro geometrii, která je znázorněna v nákresu, je rovna:

$$L(x) = L_0 \cdot \frac{x}{x + a} \quad (3.2-4)$$

Vlastní indukčnost cívky L_0 lze přitom získat jako:

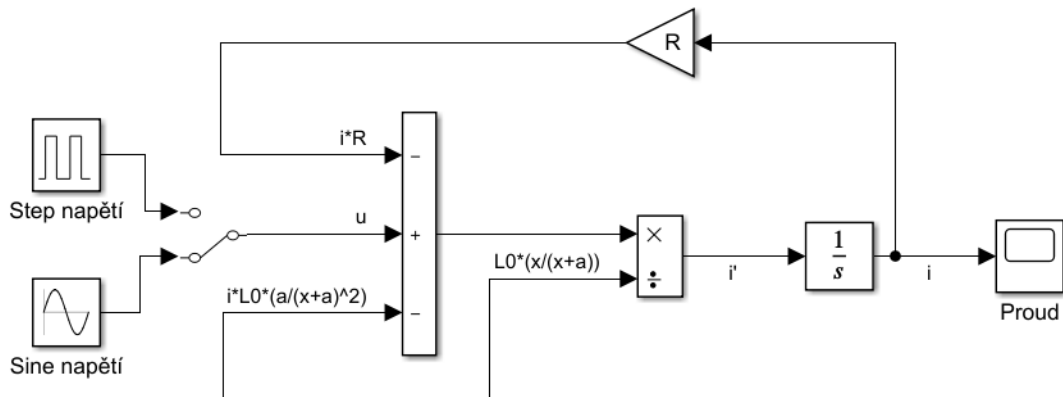
$$L_0 = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot (d + 2 \cdot s) \cdot a}{s} \quad (3.1-5)$$

V rovnici vystupuje počet závitů cívky N , permeabilita vakua μ_0 , rozměr stěny pouzdra a , průměr elektromagnetu d a vzduchová mezera s .

Aby bylo možné rovnici 3.1-3 vymodelovat v prostředí Simulink, je nutné ji převést do adekvátního tvaru. Tím se rozumí vyjádřit člen s nejvyšší derivací. V případě rovnice 3.1-3 půjde tedy o převedení derivace proudu podle času na levou stranu a zanechání ostatních veličin na levé straně. Upravená rovnice bude mít podobu:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L_0 \cdot \frac{x}{x+a}} \left(u(t) - i(t) \cdot R - i(t) \cdot L_0 \frac{a}{(x+a)^2} \frac{dx}{dt} \right) \quad (3.1-6)$$

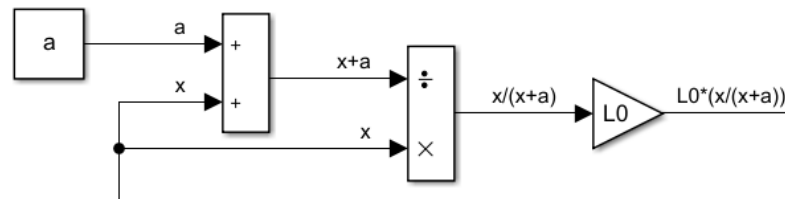
V tomto tvaru je nyní možné vytvořit její Simulinkový model.



Obrázek 3: Simulinkový model elektro-magnetické rovnice

V modelu je přepínatelný zdroj napětí. V obrázku 3 je aktivní možnost sinusového vstupu. Model lze ale přepnout také na pulsní vstup, který má nastavitelnou šířku pulzu. Transformační a pohybové napětí je pro přehlednost vymodelováno v jiné oblasti modelu, odkud je do elektro-magnetické rovnice přiváděno.

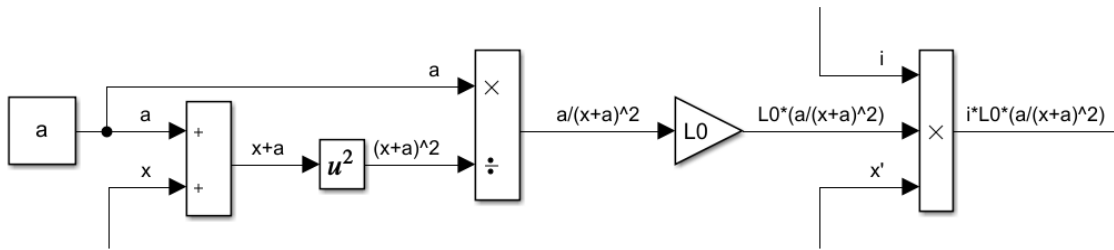
Simulinkový model rovnice transformačního napětí má následující podobu:



Obrázek 4: Simulinkový model rovnice transformačního napětí

Signál polohy x přichází do modelu z mechanické rovnice, která je popsána v pozdější kapitole. Výstupní signál je transformační napětí je veden do elektro-magnetické rovnice, jak je patrné z obrázku 3.

Simulinkový model rovnice pohybového napětí vypadá následovně:



Obrázek 5: Simulinkový model rovnice pohybového napětí

Do modelu je přiváděna informace o poloze a rychlosti kmitajícího tělesa, které jsou přivedeny z mechanické rovnice jako v případě transformačního napětí. Informace o proudu je odebírána z elektro-magnetické rovnice.

3.3 Rovnice magnetické síly

Síla magnetického původu se určí pomocí koenergie soustavy W_{co} , která se pro nelineární soustavy spočítá jako:

$$W_{co} = \int \Psi \cdot di = \frac{1}{2} L(x) \cdot i^2 \quad (3.3-1)$$

Samotnou sílu lze potom získat ze vztahu:

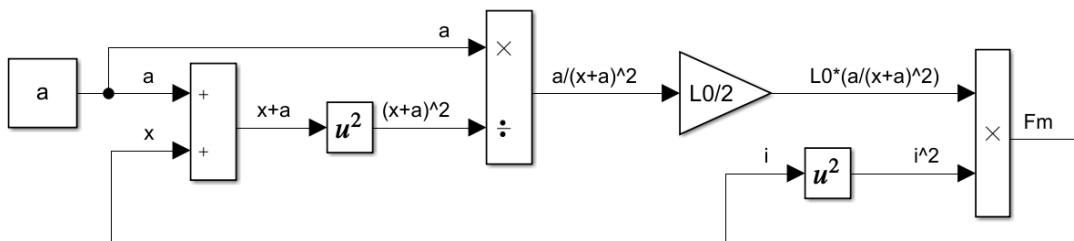
$$F_m = \frac{\partial W_{co}(i, x)}{\partial x} \quad (3.3-2)$$

Ten má po upravení na základě veličin vyjádřených v minulé podkapitole tvar:

$$F_m = \frac{1}{2} \cdot L_0 \cdot \frac{a}{(x+a)^2} \cdot i^2(t) \quad (3.3-2)$$

Vyjádřená magnetická síla popisuje model elektromagnetu z obrázku 2. Při jiné geometrii modelu, by se její hodnota lišila.

Rovnice magnetické síly v Simulinku má následující podobu:



Obrázek 6: Simulinkový model rovnice magnetické síly

Pro výpočet magnetické síly je nutné do rovnice vést polohu z mechanické rovnice a proud z elektro-magnetické rovnice. Výstupem je síla magnetického původu, která vedena do mechanické rovnice, kde budí kmitání.

3.4 Elektro-magnetické parametry modelu

Určené elektrické vlastnosti navrženého malého vibračního budiče jsou:

Vstupní napětí	u	60	[V]
Odpor vinutí	R	2	[Ω]
Počet závitů cívky	N	400	[-]
Proud	I	30	[A]

Tabulka 1: Parametry elektrické části budiče

Navržený odpor vinutí se spočítá jako:

$$R = \rho \cdot \frac{N \cdot l_z}{S} \quad (3.4-1)$$

Přičemž ρ je měrný elektrický odpor mědi, N je počet závitů vinutí, l_z je délka jednoho závitu a S je průřez vodiče.

Vhodný průřez vodiče se určí z rovnice pro hustotu elektrického proudu:

$$J = \frac{I}{S} \quad (3.4-2)$$

Kde J je hustota elektrického proudu, I je proud a S je průřez drátu.

Při návrhu budiče jsou uvažovány hodnoty v tabulce 1. Hodnota proudu pro maximální napětí bude rovna:

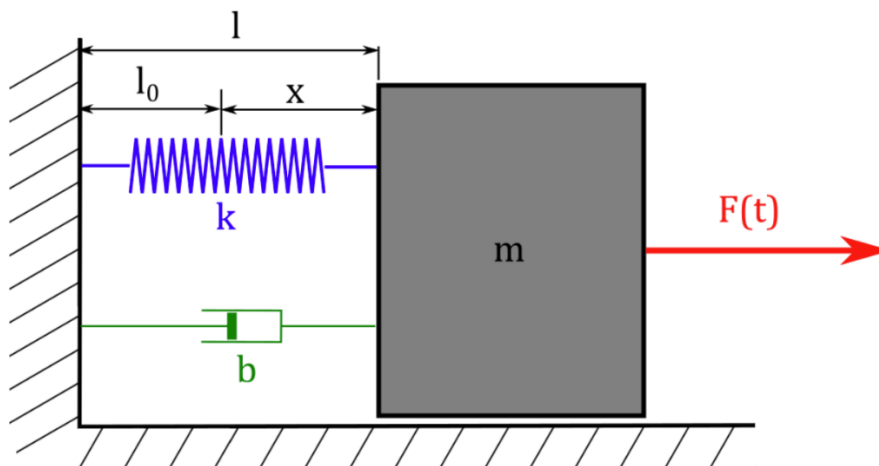
$$I = \frac{U}{R} = \frac{60}{2} = 30 \text{ A}$$

Vhodnost zvolených parametrů je zhodnocena po provedení simulací.

4 Návrh mechanické části budiče

4.1 Rovnice mechanické části budiče

Dynamický model malého vibračního budiče má jeden stupeň volnosti a dá se popsat pomocí tělesa spojeného s podstavou pružinou a tlumičem.



Obrázek 7: Dynamický model kmitání s jedním stupněm volnosti (8)

Veličina k v obrázku představuje tuhost pružiny, b koeficient viskózního tlumení, m hmotnost kmitajícího tělesa a F budící sílu.

Rovnice takového modelu je:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F \quad (4.1.1-1)$$

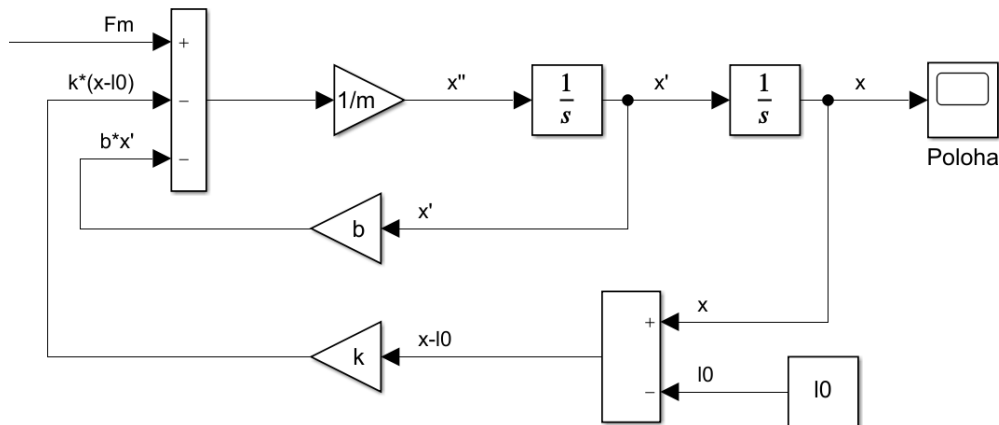
Pokud v této rovnici dosadíme za sílu F magnetickou sílu F_m a zohledníme geometrii z nákresu v obrázku 2 dostaneme tvar:

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + k(x - l_0) = \frac{1}{2} \cdot L_0 \cdot \frac{a}{(x + a)^2} \cdot i^2(t) \quad (4.1.1-2)$$

Stejným způsobem, jako bylo nutné upravit elektro-magnetickou rovnici, nyní upravíme rovnici mechanickou a vyjádříme tím zrychlení \ddot{x} :

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} \left(i^2(t) \cdot \frac{1}{2} \cdot L_0 \cdot \frac{a}{(x + a)^2} - b\dot{x} - k \cdot (x - l_0) \right) \quad (4.1.1-3)$$

Model rovnice 4.1.1-3 v Simulinku bude vypadat následovně:



Obrázek 8: Simulinkový model kmitání s jedním stupněm volnosti

Síla F_m je přivedena z elektro-magnetické části modelu.

4.2 Mechanické parametry modelu

Mechanické vlastnosti navrženého malého vibračního budiče jsou:

Tloušťka stěny pouzdra	a	0,01	[m]
Vzduchová mezera	s	0,002	[m]
Průměr elektromagnetu	d	0,006	[m]
Ustálená poloha tělesa	l_0	0,01	[m]

Tabulka 2: Rozměry mechanické části budiče

Aby bylo možné model naladit, je nutné stanovit parametry, kterých chceme docílit a následně vlastnosti modelu dopočítat. Dopočítávané vlastnosti jsou poměrný útlum, který lze získat z podílu vlastní úhlové frekvence netlumeného kmitání a součinitele doznívání, a také vlastní úhlová frekvence tlumeného kmitání, jenž je závislá na vlastní úhlové frekvenci netlumeného kmitání a poměrném útlumu. Tyto výpočty jsou provedeny podle níže uvedených rovnic.

Vlastní úhlová frekvence Ω_0 netlumeného kmitání lze získat ze vztahu:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.2-1)$$

Kde k je tuhost pružiny a m je hmotnost kmitajícího tělesa.

Součinitel doznívání δ vychází ze vztahu:

$$\delta = \frac{b}{2 \cdot m} \quad (4.2-2)$$

Kde b je koeficient viskózního tlumení a m je hmotnost kmitajícího tělesa.

Poměrný útlum b_r se spočítá jako:

$$b_r = \frac{\delta}{\Omega_0} \quad (4.2-3)$$

Vlastní úhlová frekvence tlumeného kmitání:

$$\Omega = \Omega_0 \cdot \sqrt{1 - b_r^2} \quad (4.2-4)$$

Kýžené hodnota vlastní frekvence je 40 Hz a poměrný útlum 1 % a v modelu je uvažováno kmitající těleso o hmotnosti 1 Kg. Aby těchto hodnot bylo docíleno, je nutné vhodně zvolit tuhost pružiny a koeficient viskózního tlumení:

Hmotnost kmitajícího tělesa	m	1	[Kg]
Tuhost pružiny	k	64 000	[N/m]
Koeficient viskózního tlumení	b	5	[Ns/m]

Tabulka 3: Parametry mechanické části budiče

Vlastní úhlová frekvence Ω_0 netlumeného kmitání pro zvolené hodnoty vychází:

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{64\,000}{1}} = 252,98 \frac{rad}{s}$$

Součinitel doznívání δ vychází:

$$\delta = \frac{b}{2 \cdot m} = \frac{5}{2 \cdot 1} = 2,5 \frac{rad}{s}$$

Poměrný útlum vychází:

$$b_r = \frac{\delta}{\Omega_0} = \frac{2,5}{252,98} = 0,0099$$

Vlastní úhlová frekvence tlumeného kmitání je rovna:

$$f_v = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{\Omega_0 \cdot \sqrt{1 - b_r^2}}{2\pi} = \frac{252,98 \cdot \sqrt{1 - 0,099^2}}{2\pi} = 40,07 \text{ Hz}$$

Koeficient viskózního tlumení i vlastní úhlová frekvence se velmi blíží hodnotám, na které bylo cíleno. Parametry jsou tedy zvoleny vhodně a mohou zůstat jako $k = 64\,000 \text{ N/m}$ a $b = 5 \text{ Ns/m}$.

5 Model budiče v programu Matlab/Simulink

Tato kapitola představuje m-skript, ve kterém jsou zaneseny a vypočítány parametry budiče, a ukazuje sloučení všech rovnic z dřívějších kapitol do jednoho modelu v Simulinku.

5.1 Matlab

Parametry elektro-magnetické části budiče jsou v m-skriptu uvedeny následovně:

```
%% Elektro-magnetická část budiče

u = 60;                %Vstupní napětí [V]
R = 2;                %Odpor vinutí [Ω]
N = 400;              %Počet závitů vinutí cívky [-]
```

Obrázek 9: Elektro-magnetická část budiče – Matlab

Parametry mechanické části budiče jsou v m-skriptu uvedeny následovně:

```
%% Mechanická část budiče

m = 1;                %Hmotnost tělesa [Kg]
k = 64000;            %Tuhost pružin [N/m]
b = 5;                %Koeficient viskózního tlumení [Ns/m]

a = 0.01;             %Strana [m]
s = 0.002;            %Vzduchová mezera [m]
d = 0.006;            %Šířka kmitajícího tělesa [m]14
l0 = 0.01;            %Ustálená poloha tělesa [m]
```

Obrázek 10: Mechanická část budiče – Matlab

Výpočty dopočítávaných hodnot jsou v m-skriptu provedeny následovně:

```
%% Dopočítávané hodnoty

u0 = (4*pi)*10^-7;    %Permeabilita vakua [H/m]
L0 = ((N^2)*u0*pi*(d+2*s)*a)/s; %Indukčnost [H]

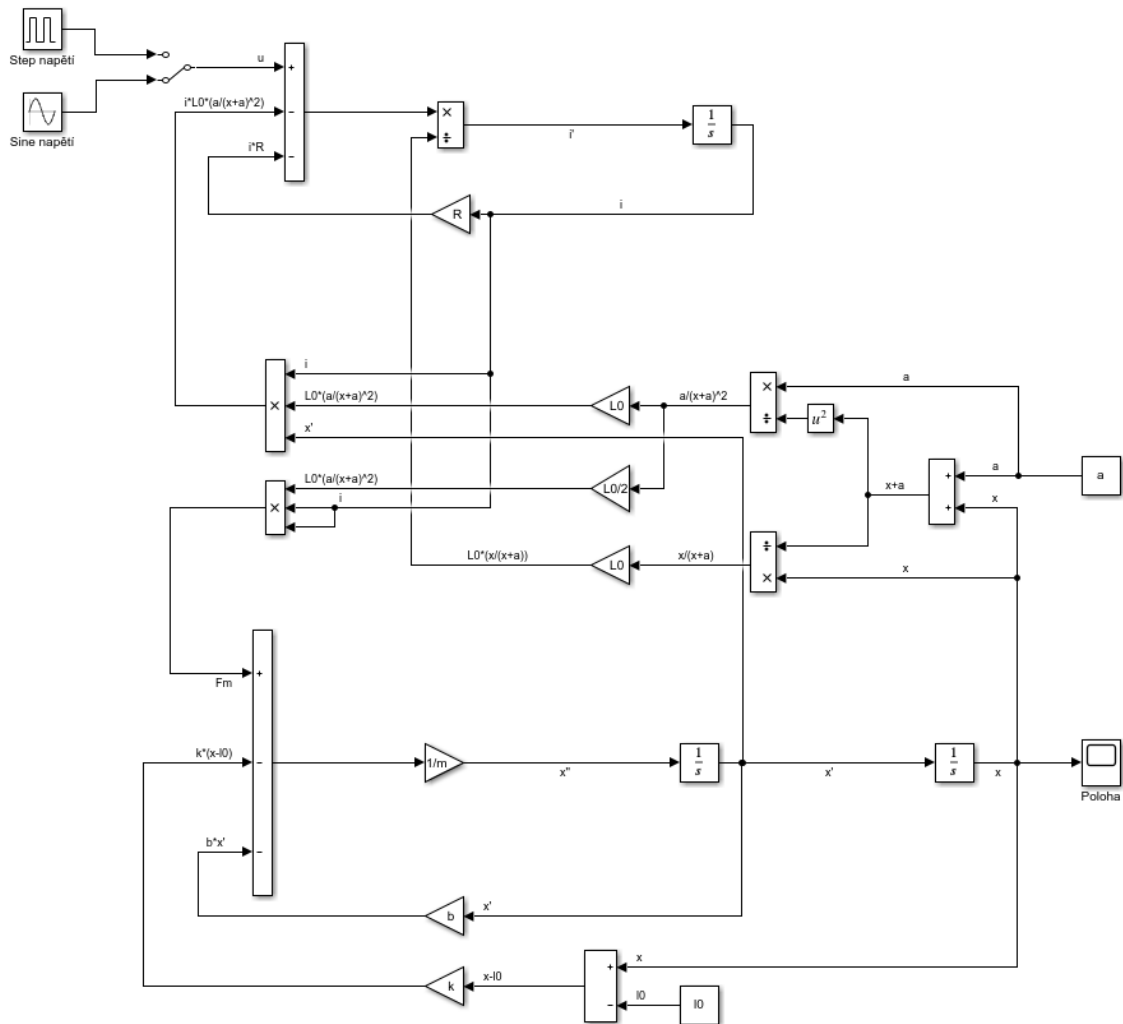
w0 = sqrt(k/m);       %Vlastní úhlová frekvence netlumeného kmitání [rad/s]
Delta = b/(2*m);      %Součinitel dozívání [rad/s]

br = Delta/w0;        %Poměrný útlum [-]
w = w0*sqrt(1-br^2);  %Vlastní úhlová frekvence tlumeného kmitání [rad/s]
fv = w/(2*pi);        %Frekvence kmitání [Hz]
Tv = 1/fv;            %Perioda [s]
```

Obrázek 11: Dopočítávané hodnoty – Matlab

5.2 Simulink

Rozložení rovnic se mírně liší od toho, ve kterém jsou znázorněny v předcházejících kapitolách. Nejedlišnější jsou výpočty, ve kterých vystupuje indukčnost L . Vystupuje totiž ve dvou členech elektro-magnetické rovnice a také je potřeba pro výpočet magnetické síly F_m . Výpočty, ve kterých vystupuje, jsou ve střední části modelu. V horní části se nachází elektro-magnetická rovnice a ve spodní mechanická rovnice.



Obrázek 12: Model budiče v Simulinku

6 Vyhodnocení návrhu budiče

6.1 Amplitudová frekvenční charakteristika

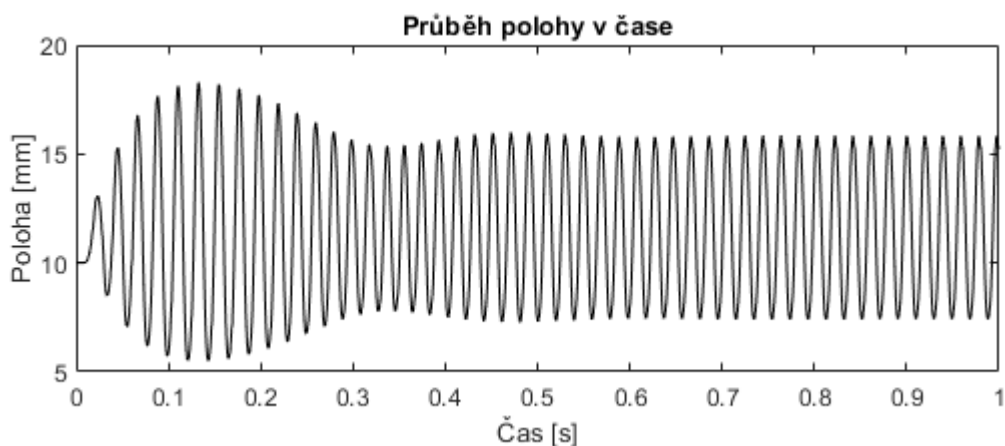
Určení vhodných pracovních podmínek budiče vychází z amplitudové frekvenční charakteristiky. Pro mechanický model s jedním stupněm volnosti lze očekávat výslednou charakteristiku s jednou rezonanční frekvencí. Tato vlastní frekvence je počítána ve čtvrté kapitole a je 40 Hz a byla využita pro určení mechanických vlastností budiče. V celkovém modelu je ovšem magnetická síla F_m závislá na poloze x podle rovnice 3.3-1. To přidává do systému druhý stupeň volnosti a úloha je tím pádem nelineární.

6.1.1 Amplitudová frekvenční charakteristika pro sinusový zdroj napětí

Vykreslení amplitudové frekvenční charakteristiky je provedeno tak, že je za pomoci příkazu `linspace` určen vektor s nejnižší a nejvyšší vykreslovanou frekvencí a také krok, kterým se má škála rozdělit. V případě kódu na obrázku to je na padesát dílků, takže krok jsou přibližně 2 Hz.

Dále je určena šířka pulsu, protože je stejný kód používán také pro zdroj skokového napětí.

Cyklos `for` provede pro každou frekvenci uvedenou ve vektoru x simulaci a zapíše její výsledky, tedy informaci o poloze vibrujícího tělesa, do vektoru $vych$. V simulaci trvá vždy nějaký čas, než se amplituda výchylky ustálí, jako je patrné v obrázku 12.



Graf 1: Průběh polohy v čase při frekvenci 28 Hz

Z tohoto důvodu je v kódu druhý cyklus `for`, který odstraní hodnoty vektoru $vych$ před ustálením. Nakonec je odečten rozdíl nejvyšší a nejnižší výchylky, který je vydělen dvěma, pro získání hodnoty amplitudy. Tato hodnota je metrech, takže výsledek je pro přehlednosti vynásoben tisícem a vykreslován do grafu v milimetrech.


```

%% Amplitudová frekvenční charakteristika

x = linspace(5,100,50);           %Vektor frekvencí
n = length(x);                   %Délka vektoru frekvencí
width = 50;                       %Šířka pulsu [% z periody]

for i = 1:1:n
    frek = x(i);                 %Frekvence napětí
    sim('budic_sim',1);         %Spuštění simulace
    vych = ans.vychylka.data;    %Uložení výstupu do vektoru
    q = length(vych)/2;         %Zjistí délku půlky vektoru s výsledky

    for j = 1:1:q
        vych(1) = [];          %Smaže první polovinu výsledků, aby
    end                          %zůstaly pouze výsledky po ustálení

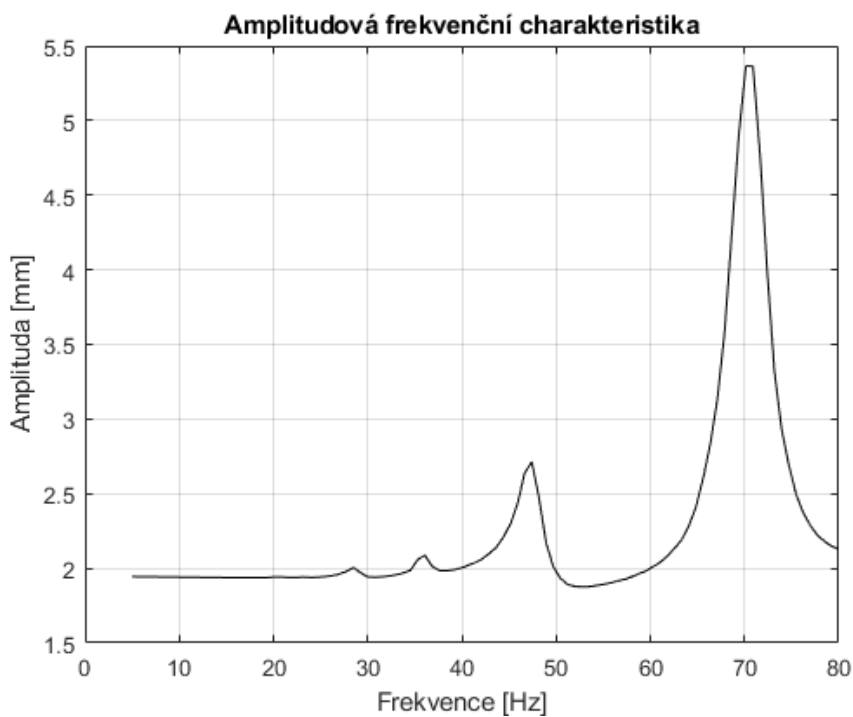
    y(i) = (max(vych)-min(vych))*1000/2; %Vektor všech amplitud [mm]
end

figure(1)
plot(x,y,'black')
title('Amplitudová frekvenční charakteristika')
xlabel('Frekvence [Hz]')
ylabel('Amplituda [mm]')
set(gcf,'color','w');
grid on

```

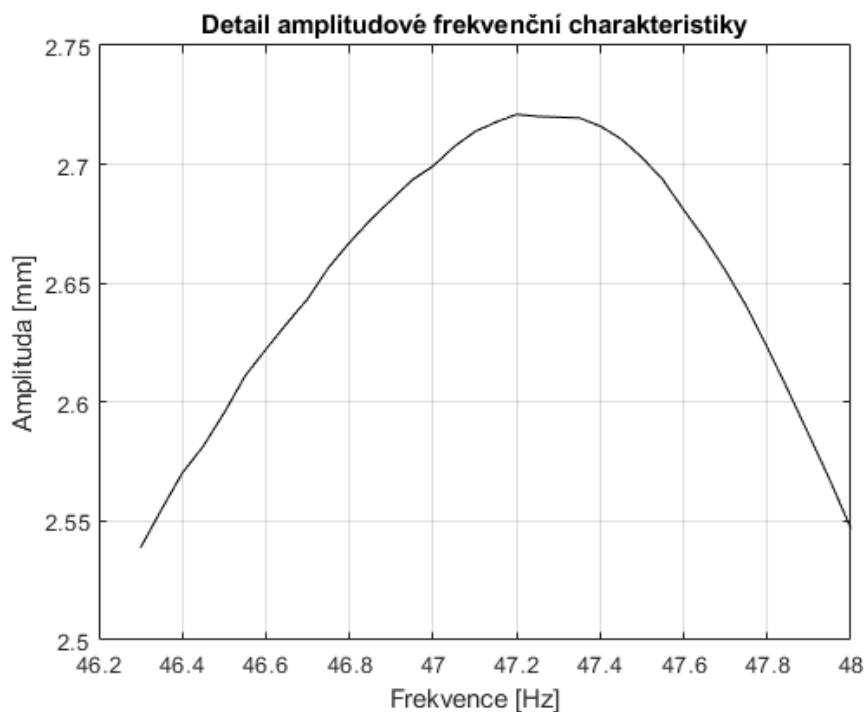
Obrázek 13: Kód vykreslení amplitudové frekvenční charakteristiky

Amplitudová frekvenční charakteristika pro sinusový vstup vygenerovaná kódem z obrázku 13 vypadá následovně:

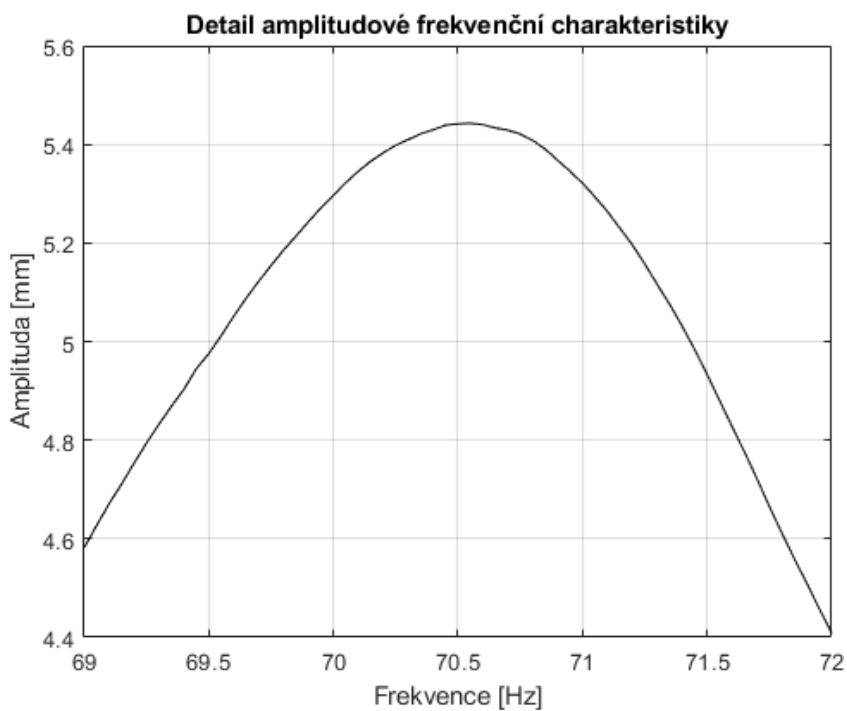


Graf 2: Amplitudová frekvenční charakteristika pro sinusový vstup

V grafu na obrázku 14 lze vidět dvě rezonanční frekvence. Jedna v okolí 47 Hz a druhá v okolí 71 Hz. Amplitudová frekvenční charakteristika je pro ně vykreslena podrobněji s krokem 0,05 Hz:



Graf 3: Detail amplitudové frekvenční charakteristiky v okolí 47 Hz

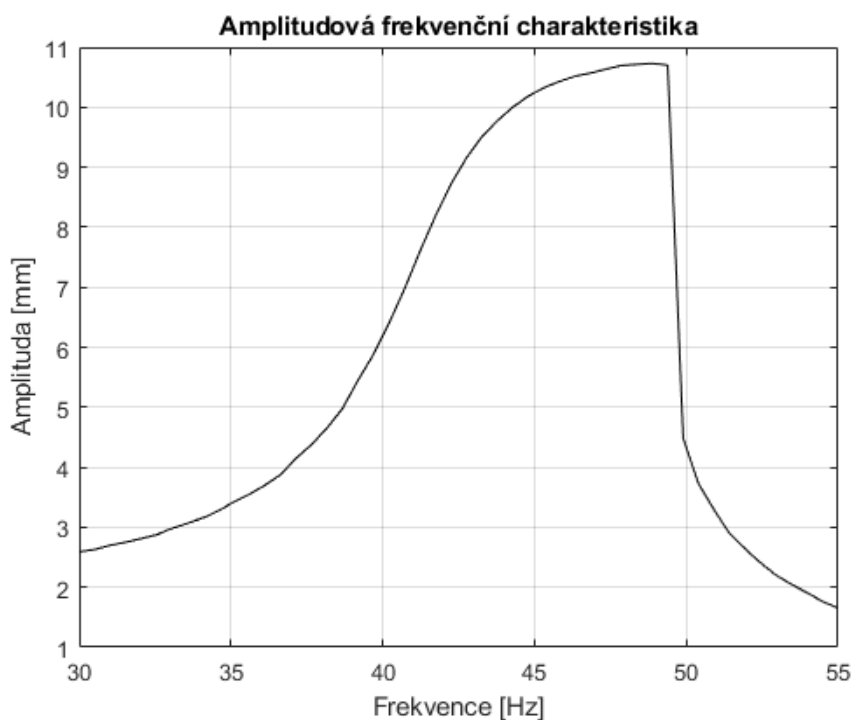


Graf 4: Detail amplitudové frekvenční charakteristiky v okolí 71 Hz

6.1.2 Amplitudová frekvenční charakteristika pro pulzový zdroj napětí

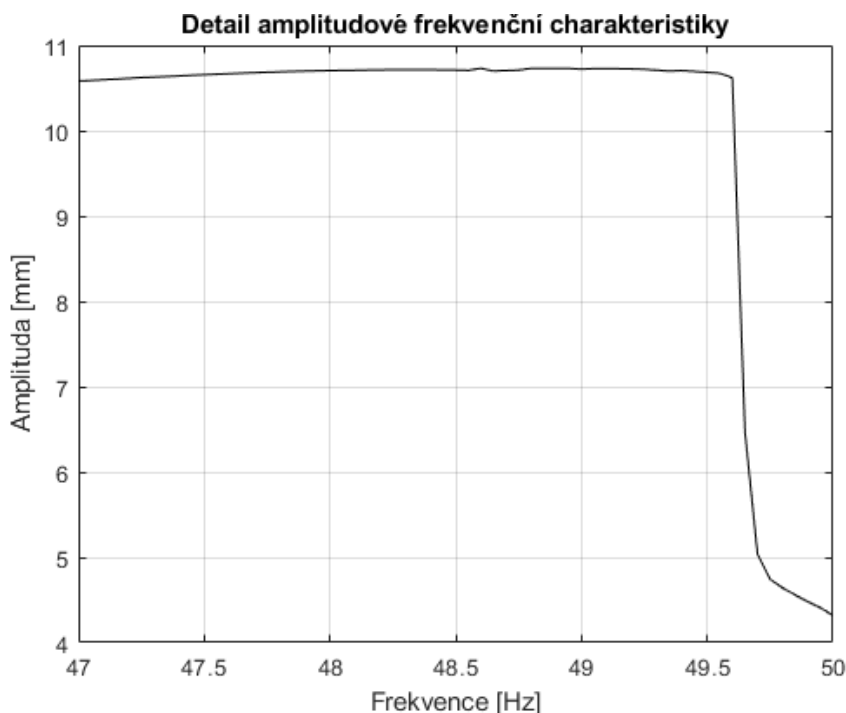
Při vstupním napětí z pulzního generátoru se v úloze musí zvážit vhodná šířka pásma. Amplitudová frekvenční charakteristika bude také mít předpokládatelný průběh pouze v užším frekvenčním rozmezí než v případě sinusového zdroje napětí. Při příliš nízkých nebo vysokých frekvencích nemá výstupní poloha charakter sinusový, nýbrž nepředvídatelně skokový. Z toho důvodu není vhodné budič při těchto frekvencích používat.

Pro vykreslení amplitudové frekvenční charakteristiky bylo zvoleno rozmezí od 30 do 50 Hz a šířka pásma 50 % periody:



Graf 5: Amplitudová frekvenční charakteristika pro pulzní vstup

V charakteristice je vidět tvrdnoucí nelinearita způsobená zpětnou vazbou polohy v magnetické síle. Rezonanční místo je v okolí 49 Hz.



Graf 6: Detail amplitudové frekvenční charakteristiky v okolí 49 Hz

6.1.3 Závislost amplitudy na šířce pásma

Amplituda polohy se, jak již bylo zmíněno, mění s šířkou pásma. Pro vytvoření amplitudové frekvenční charakteristiky pro zdroj pulzního napětí bylo využito pásmo 50 % času periody. Polovina periody ale neznamená nutně největší amplitudu. Pro zjištění závislosti amplitudy na šířce pásma je využit podobný kód jako pro amplitudovou charakteristiku.

```

%% Závislost amplitudy na změně šířce pásma

x = linspace(1,99,188);           %Vektor šířek pásma
n = length(x);                   %Délka vektoru šířek pásma
frek = 30;                        %Frekvence vstupního napětí [Hz]

for i = 1:1:n
    width = x(i);                 %Šířka pásma
    sim('budic_sim',1);          %Spuštění simulace
    vych = ans.vychylka.data;     %Uložení výstupu do vektoru
    q = length(vych)/2;          %Zjistí délku půlky vektoru s výsledky

    for j = 1:1:q
        vych(1) = [];            %Smaže první polovinu výsledků, aby
    end                            %zůstaly pouze výsledky po ustálení

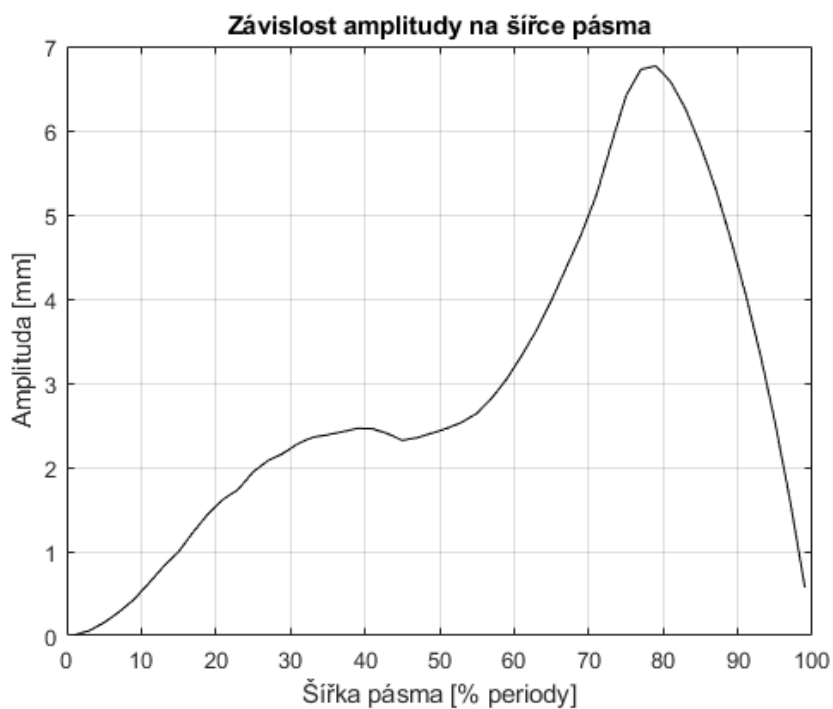
    y(i) = (max(vych)-min(vych))*1000/2; %Vektor všech amplitud [mm]
end

figure(1)
plot(x,y,'black')
title('Závislost amplitudy na šířce pásma')
xlabel('Šířka pásma [% periody]')
ylabel('Amplituda [mm]')
set(gcf,'color','w')
grid on

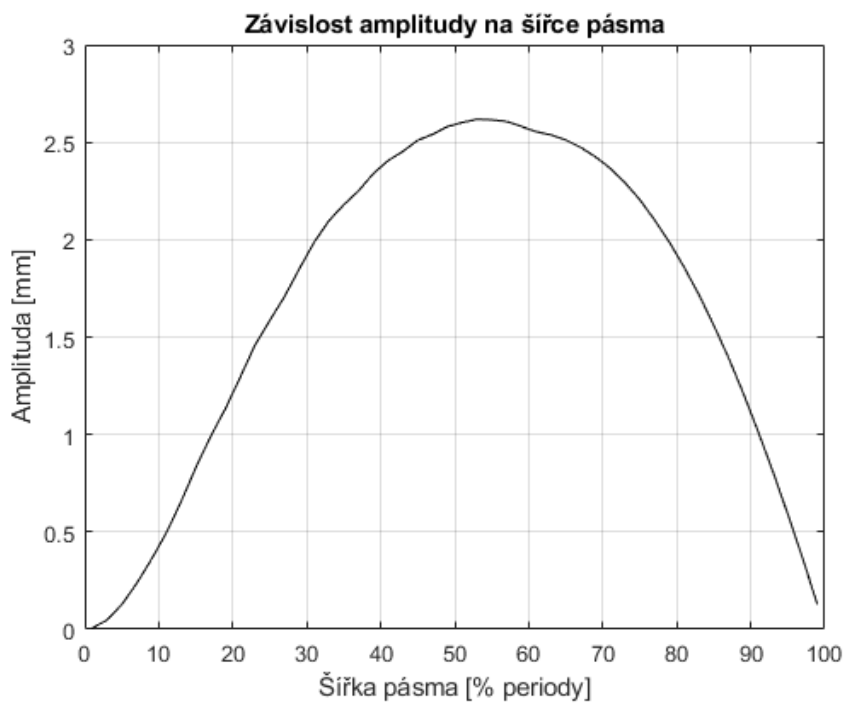
```

Obrázek 14: Kód vykreslení závislosti amplitudy na šířce pásma

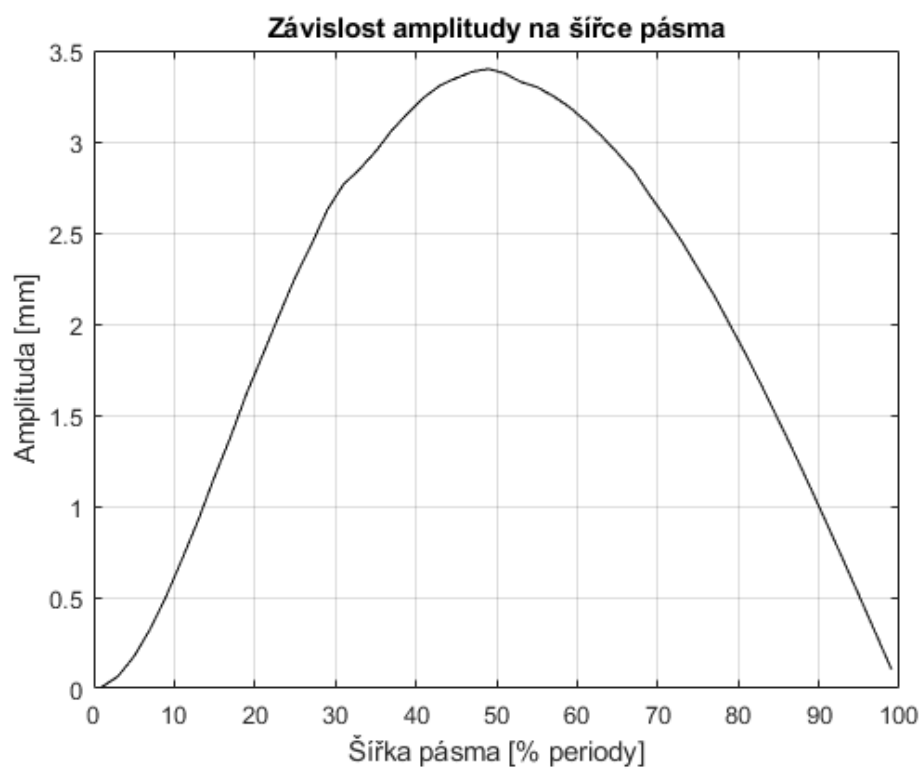
V Matlabu byly provedeny čtyři simulace pro frekvence 25, 30, 35 a 40 Hz.



Graf 7: Závislost amplitudy na šířce pásma při 25 Hz



Graf 8: Závislost amplitudy na šířce pásma při 30 Hz



Graf 9: Závislost amplitudy na šířce pásma při 35 Hz

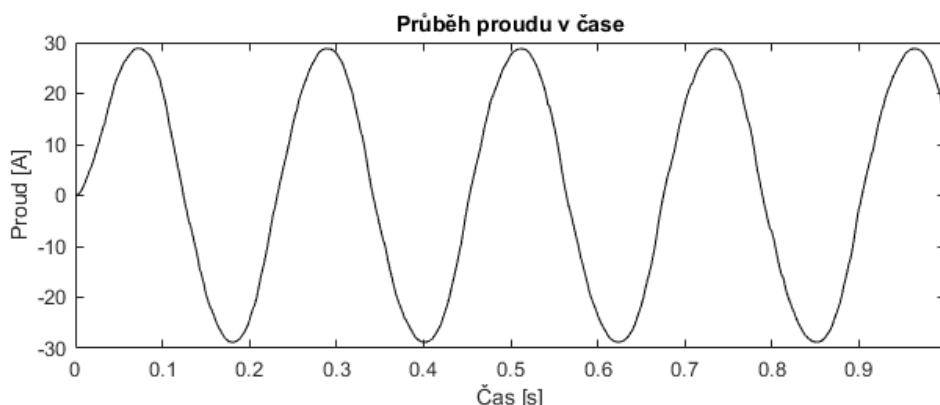


Graf 10: Závislost amplitudy na šířce pásma při 40 Hz

Z výsledných grafů je vidět, že při příliš nízkých nebo naopak vysokých frekvencích je výsledná charakteristika nespolehlivá. Vhodné frekvenční rozmezí je tedy vyšší než 25 Hz a nižší než 40 Hz. Z grafů také plyne, že čím vyšší je frekvence, tím vhodnější je menší šířka pásma. Pokud je tedy při určité frekvenci požadována nejvyšší amplituda, je nutné provést simulaci pro danou frekvenci a podle výsledku určit nejvhodnější šířku pásma.

6.2 Zhodnocení navržených elektrických parametrů

V kapitole 3.4 byl určen odpor vinutí $R = 2 \Omega$ a počet závitů vinutí $N = 400$. Průběh proudu v cínce má při těchto vlastnostech následující charakter:



Graf 11: Průběh proudu pro cívku s 400 závity

Proud dosahuje vyšších hodnot při nízkých frekvencích. Jeho maximální hodnota však nepřekračuje $I = 30 \text{ A}$. Hustota elektrického proudu J by neměla být vyšší, než 8 A/mm . Je proto nutné zjistit dostupné šířky vodičů a vybrat vhodný průřez, který bude mít při hustotě 8 A/mm hodnotu alespoň:

$$S = \frac{I}{J} = \frac{30}{8} = 3,75 \text{ mm}^2$$

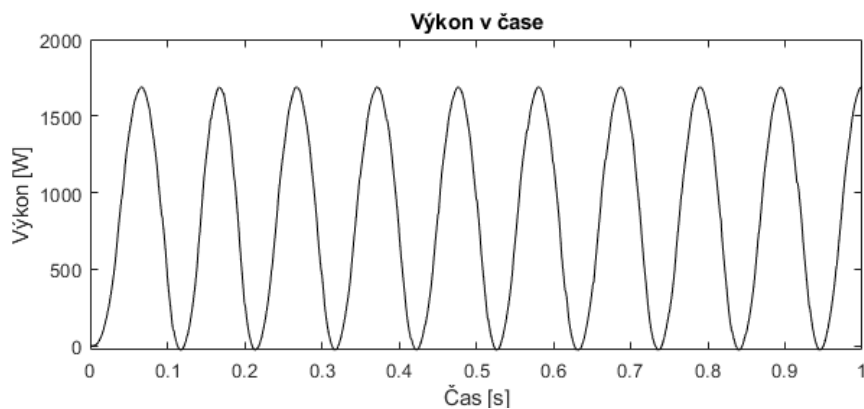
Výsledný rozměr se na škále dostupných vodičů pohybuje mezi největšími dostupnými. (11)

Délka jednoho závitu by v případě průřezu vodiče $S = 3,75 \text{ mm}^2$, počtu závitů $N = 400$, měrného elektrický odporu mědi $\rho = 0,0178 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ m}$ a odporu vinutí $R = 2 \Omega$ byla:

$$l_z = \frac{R \cdot S}{N \cdot \rho} = \frac{2 \cdot 3,75 \cdot 10^{-6}}{400 \cdot 17,8 \cdot 10^{-9}} = 1,053 \text{ m}$$

Délka $1,053 \text{ m}$ je pro malý vibrační budič poměrně vysokou hodnotou. Lze ji zmenšit zvýšením počtu závitů. S jejich navýšením poklesne proud v cínce, ale změní se také indukčnost cívky.

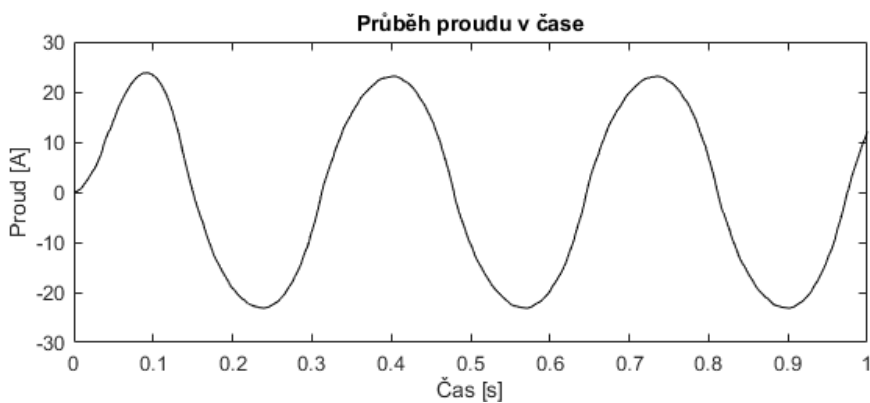
Průběh výkonu při 400 závitech má následující charakter:



Graf 12: Výkon v čase pro cívku se 400 závity

Jeho střední hodnota vypočítaná z konečného počtu period v čase 0,95 s je 821 W.

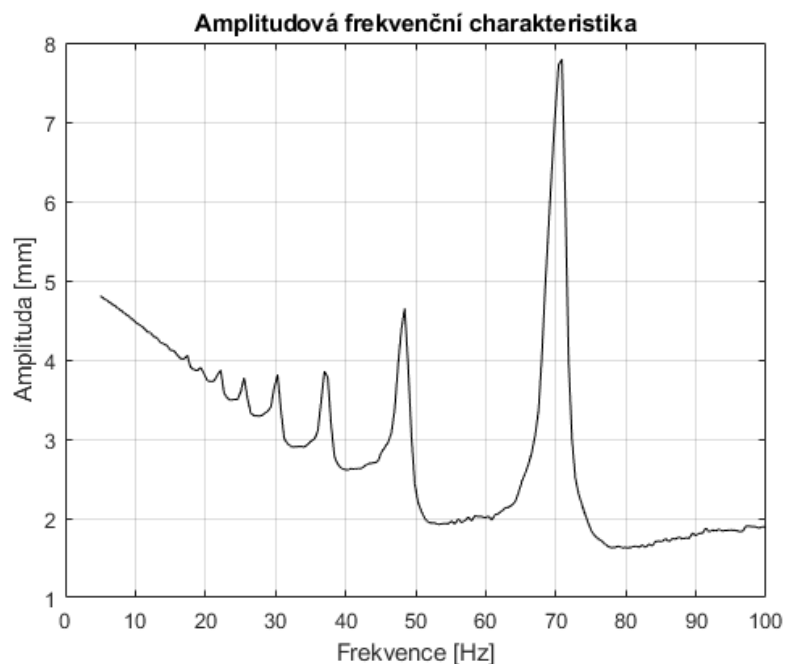
Pokud zvýšíme počet závitů na 800, proud bude mít průběh:



Graf 13: Průběh proudu pro cívku s 800 závity

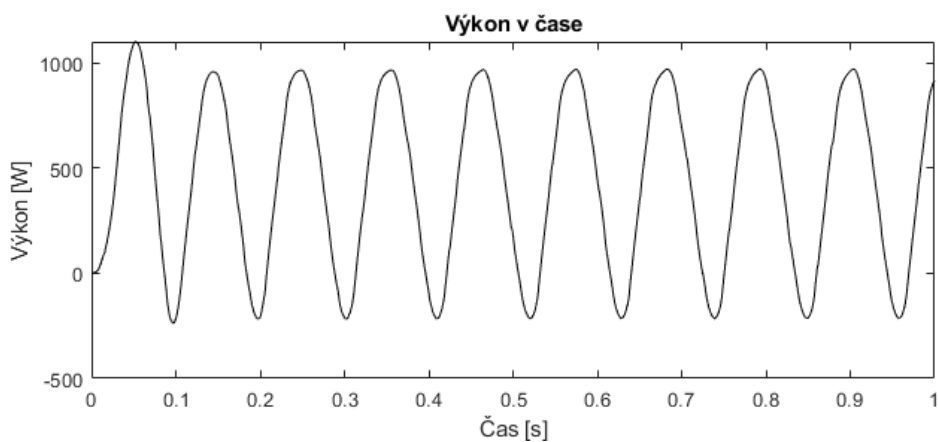
Amplituda proudu se sníží na 23,8 A.

Amplitudová frekvenční charakteristika bude mít tvar:



Graf 14: Amplitudová frekvenční charakteristika pro cívku s 800 závitů

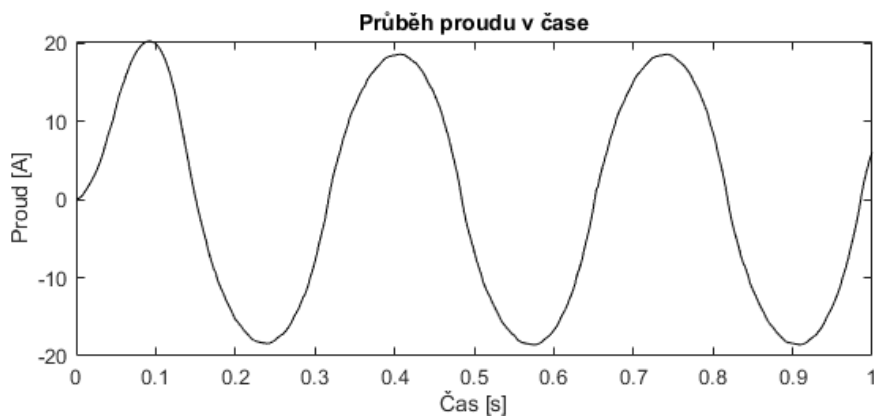
Průběh výkonu se změří na:



Graf 15: Výkon v čase pro cívku se 800 závitů

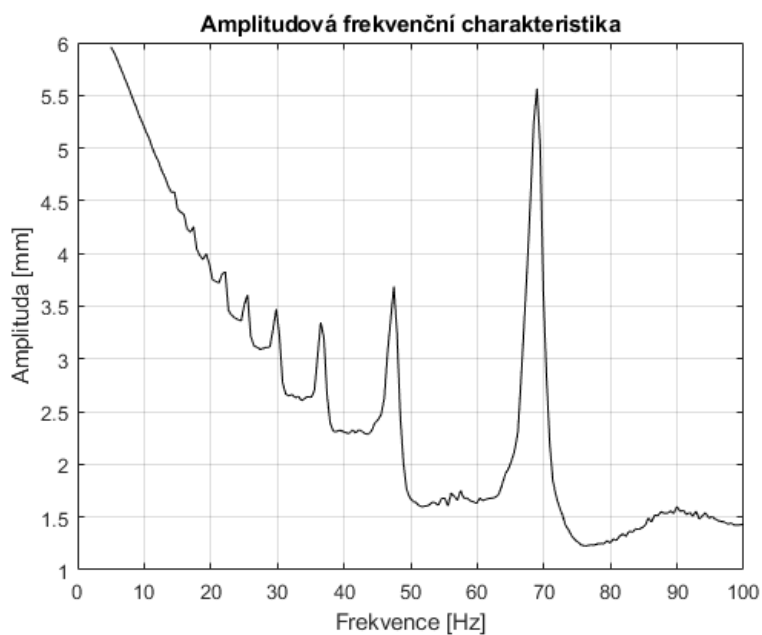
Střední hodnota výkonu je počítána od druhé vlny po konečný počet period v čase 0,95 s a nabývá 433 W.

Pro vinutí s 1000 závitů je průběh proudu:



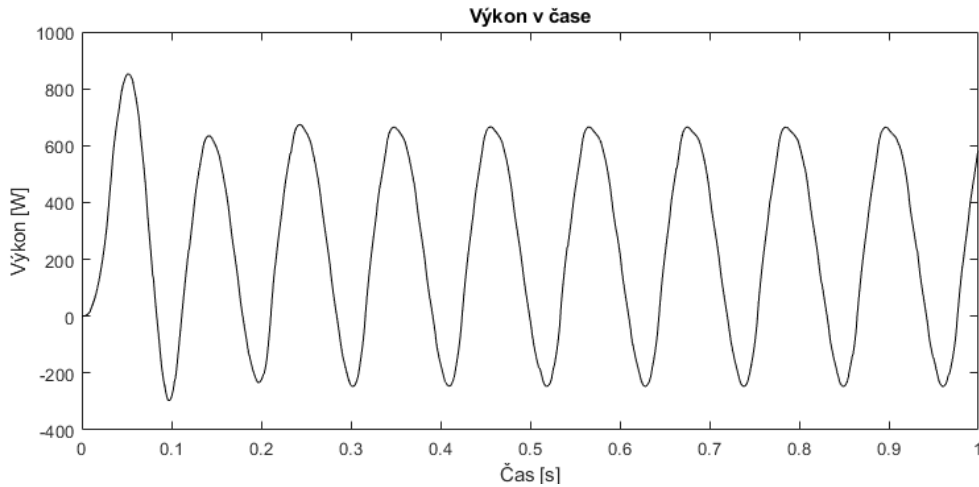
Graf 16: Průběh proudu v závislosti na čase pro cívku s 1000 závitů

Amplituda proudu je v tomto případě po ustálení 18,6 A. Amplitudová frekvenční charakteristika bude pro model s 800 závitů vypadat následovně:



Graf 17: Amplitudová frekvenční charakteristika pro cívku s 1000 závitů

Průběh výkonu je:



Graf 18: Výkon v čase pro cívku s 1000 závitů

Střední hodnota výkonu je počítána od ustálení po druhé vlně a po končený počet period v čase 0,96 s a nabývá hodnoty 244 VA.

Výpočet potřebné délky jednoho závitu l_z se změnil na:

$$S = \frac{I}{J} = \frac{18,6}{8} = 2,325 \text{ mm}^2$$

$$l_z = \frac{R \cdot S}{N \cdot \rho} = \frac{2 \cdot 2,325 \cdot 10^{-6}}{400 \cdot 17,8 \cdot 10^{-9}} = 0,653 \text{ m}$$

Vydělením délky závitu hodnotou 2π získáme poloměr obvodu vinutí cívky:

$$r_{Cu} = \frac{l_z}{2\pi} = \frac{0,653}{2\pi} = 10,04 \text{ cm}$$

Tato hodnota je pro model budiče mnohem vhodnější. Je ale nutno brát na vědomí, že pokud tímto způsobem bude dosaženo zmenšení budiče, zvýšení počtu závitů ovlivní indukčnost a tím se změní chování budiče především při nízkých frekvencích, jak je patrné z grafů amplitudových frekvenčních charakteristik.

Při známém l_z je nyní nutné zpětně navrhnout rozměry budiče. Výška vinutí cívky b lze dopočítat jako:

$$b_{Cu} = \frac{S_{Cu}}{\left(r_{Cu} - s - \frac{d}{2}\right)} \quad (6.2-1)$$

Příčemž plochu vinutí cívky S_{Cu} získáme z počtu závitů N , průřezu drátu S_d a koeficientu plnění, který je roven 0,6.

$$S_{Cu} = S_d \cdot N \cdot 0,6 \quad (6.2-2)$$

Minimální průřez vodiče získáme ze vztahu:

$$S = \frac{I}{J} = \frac{14,64}{8} = 1,83 \text{ mm}^2$$

Aby bylo vodič snazší ohýbat, místo jednoho vodiče o minimálním průřezu 1,83 lze z nabídky dostupných vodičů vybrat vodič poloviční a vinutí udělat dvojité. Vhodný dostupný drát má průřez 0,957 mm². (11)

Poloměr drátu je:

$$d_d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = 1,104 \text{ mm}$$

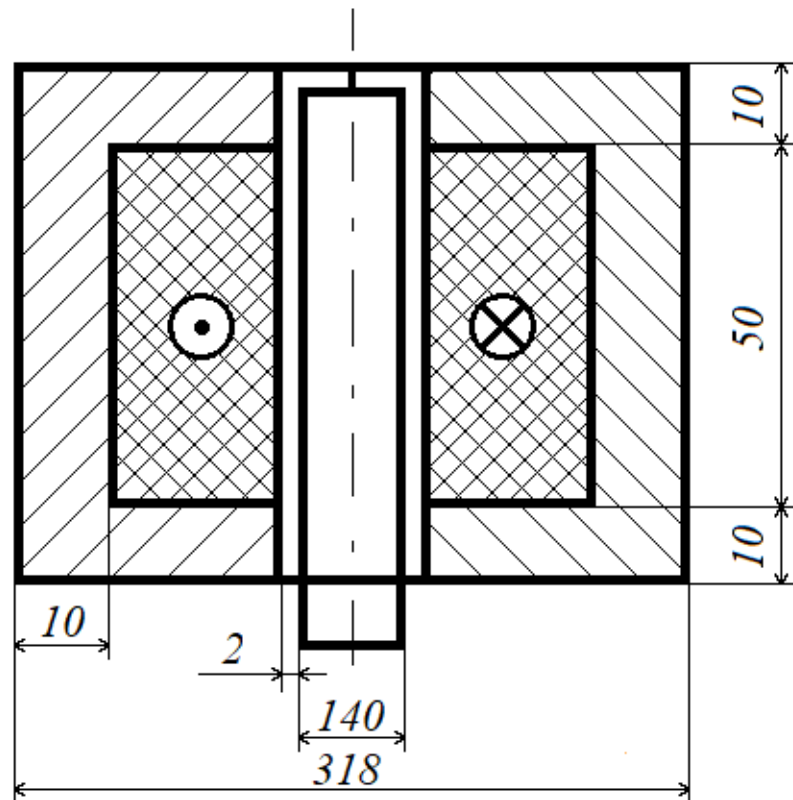
Ve výpočtu plochy vinutí S_{Cu} je k tomuto rozměru nutno přičíst rozměr izolace 0,08 mm:

$$S_{Cu} = 2 \cdot (1,104 + 0,08) \cdot 1000 \cdot 0,6 = 14,2 \text{ cm}^2$$

Nyní lze vyčíslit potřebnou výšku cívky:

$$b_{Cu} = \frac{14,2}{\left(10,04 - 0,2 - \frac{14}{2}\right)} = 5 \text{ cm}$$

Nákres navrženého modelu tedy je:



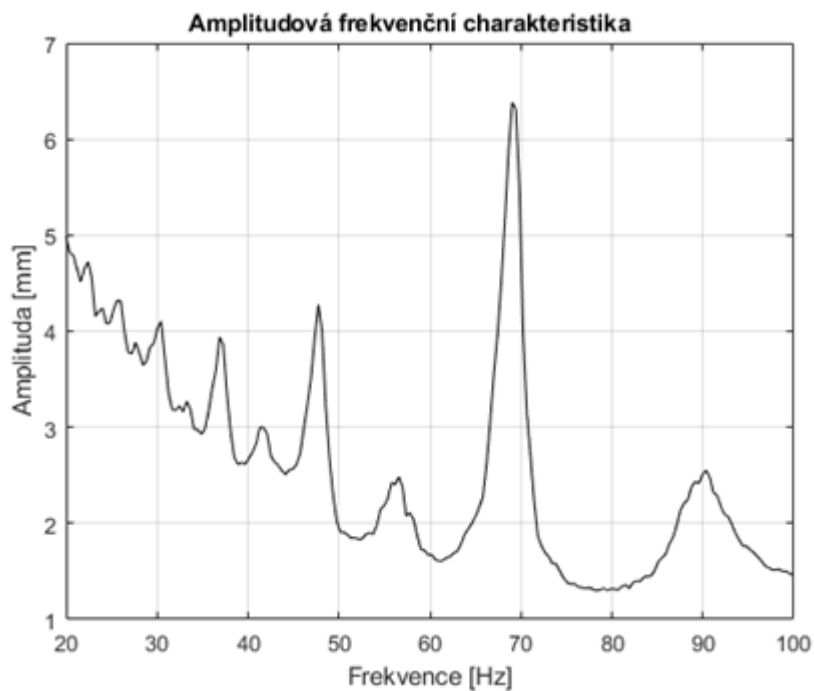
Obrázek 15: Nákres budiče s rozměry v milimetrech

Se určeným drátem zpětně zjistíme odpor vinutí:

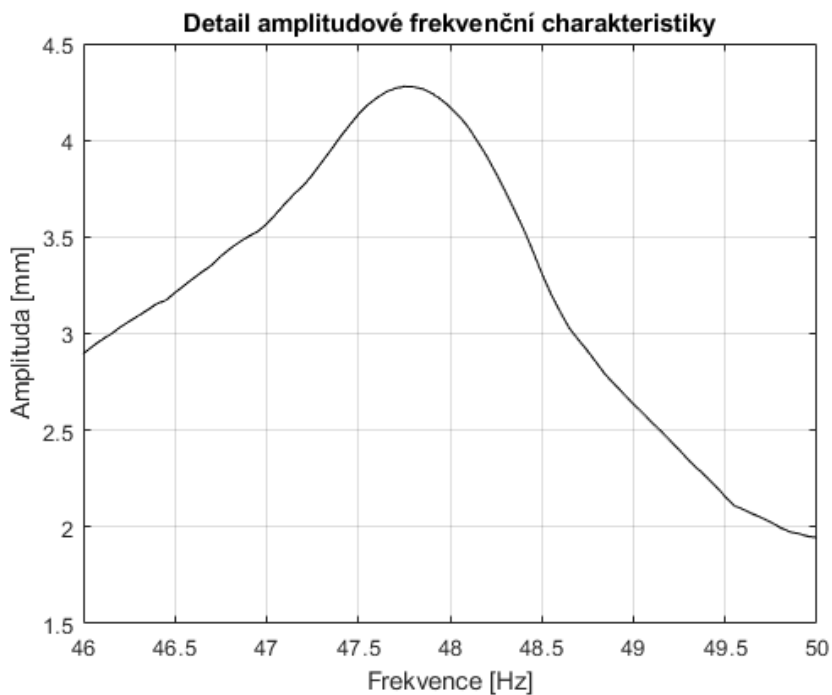
$$R = \rho \cdot \frac{l_z \cdot N}{p \cdot S} = 17,8 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{0,1004 \cdot 1000}{2 \cdot 0,957 \cdot 10^{-6}} = 1 \Omega$$

Model s novými parametry nyní bude mít jiné vlastnosti, a proto je potřeba udělat nové vyšetření amplitudové frekvenční charakteristiky.

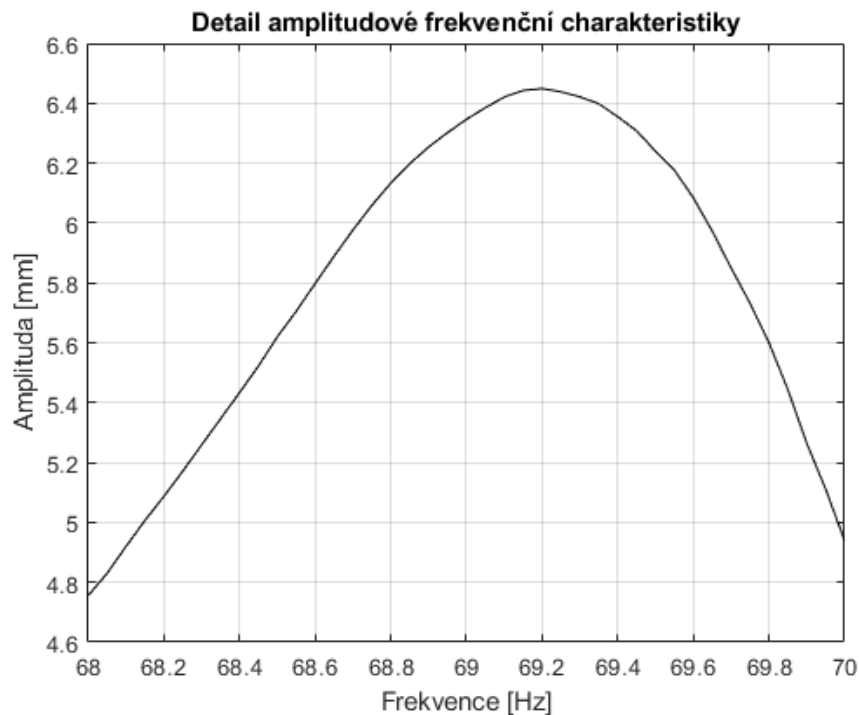
Amplitudová frekvenční charakteristika pro navržený model budiče:



Graf 19: Amplitudová frekvenční charakteristika navrženého budiče



Graf 20: Detail amplitudové frekvenční charakteristiky v okolí 47 Hz

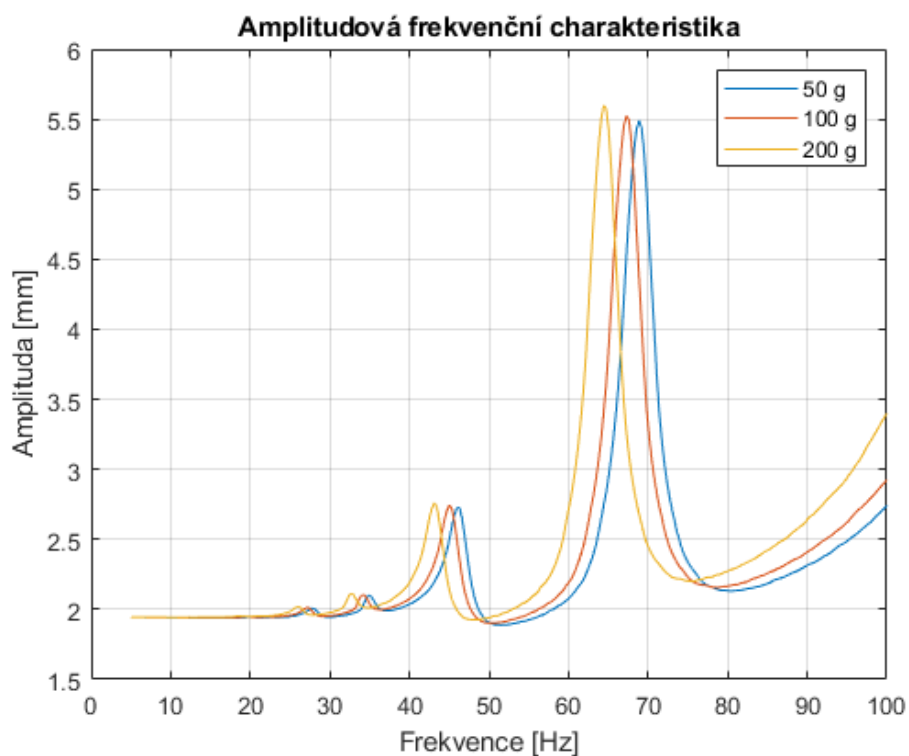


Graf 21: Detail amplitudové frekvenční charakteristiky v okolí 69 Hz

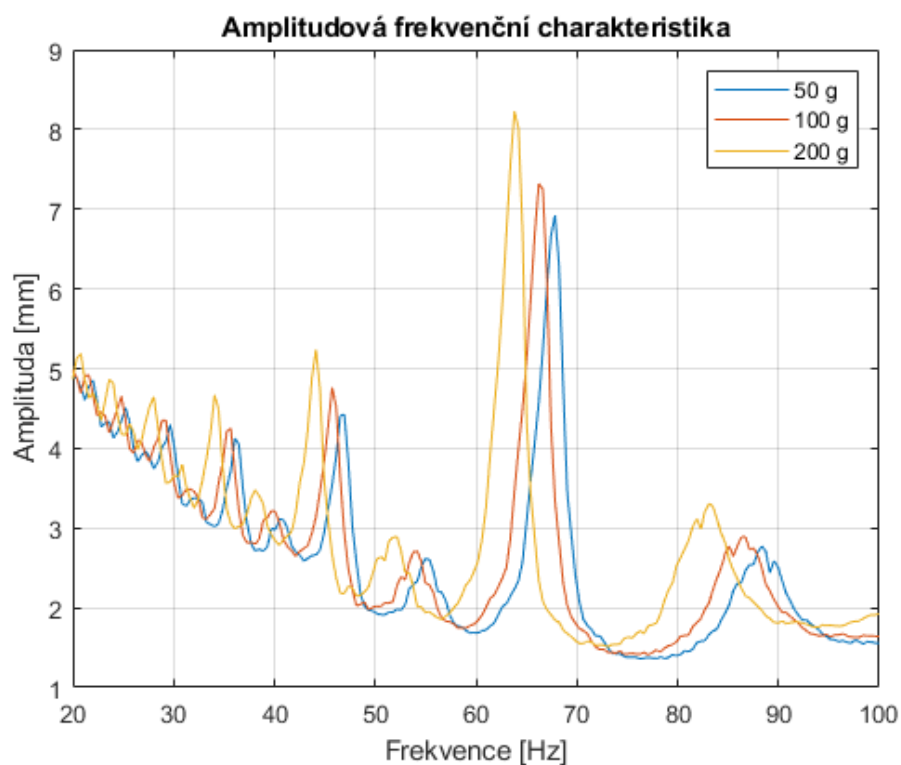
6.3 Vhodné aplikace navrženého budiče

Z minulé kapitoly vyplývá, že pro budič je vhodnější používat sinusový zdroj napětí. V úloze je počítáno s kmitajícím tělesem o hmotnosti 1 Kg, takže model budiče nelze použít pro kmitání s velkými předměty, jako například kusy karoserie, protože by se na kmitající těleso musel připevnit ještě jeden rezonátor. Model je tedy vhodné využít tím způsobem, že se na kmitající těleso přidělá například drobná elektronika. Pomocí budiče lze potom zjistit odolnost elektronického výrobku vůči mechanickému chvění, jeho vlastní frekvence, nebo nasimulovat transportní podmínky při přepravě výrobku.

Každá přidaná hmotnost ovšem ovlivní budič. Zde jsou proto uvedeny amplitudové charakteristiky pro model s přidanou hmotností 50, 100 a 200 gramů:



Graf 22: Amplitudová frekvenční charakteristika s přidanými hmotnostmi pro model s 400 závitů



Graf 23: Amplitudová frekvenční charakteristika s přidanými hmotnostmi pro model s 1000 závitů

Z grafů je patrné, že k rezonancím s rostoucí hmotností dochází dříve, tedy při nižší frekvenci a maximální výchylka vzrůstá.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši na téma malé vibrační budiče a seznámit se s jejich konstrukcí, navrhnout elektro-magnetickou část budiče, navrhnout mechanickou část budiče, vytvořit model navrženého budiče v programu Matlab/Simulink a vyhodnotit možnosti jeho využití.

Rešeršní část práce se věnuje různým dostupným budičům na zahraničním trhu, protože český trh není v tomto ohledu příliš rozvinutý. Jsou uvedeny vlastnosti a parametry jednotlivých budičů a je popsáno dělení budičů do tří kategorií podle využití a způsobu přenášení vibrací. Konec rešeršní části se také zabývá možnými způsoby konstrukce vibračních budičů.

Následující část uvádí do problematiky elektromechanických soustav a zaměřuje se na navrhnutí elektro-magnetické části budiče. Je v ní odvozeno sestavení elektro-magnetické rovnice vstupního napětí a její úprava pro zpracování v Simulinku, a stejně tak odvození magnetické síly z koenergie soustavy. Jsou v ní také navrženy elektro-magnetické parametry.

Kapitola věnující se mechanické části budiče uvádí sestavení dynamické rovnice pro model s jedním stupněm volnosti a vhodně jej aplikuje na geometrii navrhovaného vibračního budiče.

Rovnice jsou zpracovány v programu Simulink, který je doplněn m-skriptem v programu Matlab. Pro model budiče je provedeno množství simulací, které vykreslují amplitudovou frekvenční charakteristiku pro sinusový i pulzní zdroj napětí při různých frekvencích. U pulzního zdroje je vyšetřeno vhodné nastavení šířky pásma.

Využití navrženého vibračního budiče je zhodnoceno jako vhodné pro testování malých elektronických zařízení a senzorů, které lze připevnit na povrchovou plošku budiče. Pro tři přídatné hmotnosti, reprezentující elektronická zařízení, jsou vykresleny amplitudové frekvenční charakteristiky, aby bylo patrné, jak se vlastnosti budiče po připevnění drobného tělesa změnil.

Závěrem je možné konstatovat, že stanovených cílů bylo dosaženo.

Seznam použitých zdrojů

1. **Kratochvíl, Ctirad.** *Mechanika těles.* Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2007. 978-80-214-3446-2.
2. Brüel & Kjær B&K Sound and Vibration Measurement. [Online] Hottinger Brüel & Kjær A/S. <https://www.bksv.com/en/instruments/vibration-testing-equipment/modal-exciter/modal-exciter-4824>.
3. Type 4810 Mini-Shaker - Durnham Instruments. *disensors.* [Online] Durham Instruments, 2019. <https://disensors.com/product/type-4810-mini-shaker/>.
4. LDS V201 Permanent Magnet Shaker - Durham Instruments. *disensors.* [Online] Durham Instruments, 2019. <https://disensors.com/product/lds-v201-permanent-magnet-shaker/>.
5. Modal Exciter 13 lbf Excitation The Modal Shop, Inc. *The Modal Shop, Inc.* [Online] The Modal Shop, Inc., 2021. <https://www.modalshop.com/excitation/13-lbf-Modal-Exciter?ID=249>.
6. Vibration Shakers Technical Specifications Dewesoft. *Data Acquisition Systems (DAQ) and Solutions Dewesoft.* [Online] DEWEsoft, 2021. <https://dewesoft.com/products/interfaces-and-sensors/shakers/tech-specs>.
7. Electrodynamic Exciter Family Ecitation The Modal Shop. *The Modal Shop, Inc.* [Online] The Modal Shop, Inc., 2021. <https://www.modalshop.com/excitation/Electrodynamic-Exciter-Family?ID=243>.
8. MATEC Web of Conferences. The shaker parameters estimation, a first step to virtual testing. *MATEC Web of Conferences.* [Online] 2017. https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/07/mateconf_icoev2018_05003.pdf. 2261-236X.
9. Ondrůšek. *Dynamika elektromechanických soustav.* Brno : podpory k předmětu MDES, UVEE FEKT VUT, 2013.
10. FITZGERALD, A. E., Charles KINGSLEY a Stephen D. UMANS. *Eletric machinery. 6tg ed.* Boston : Mass.: McGraw-Hill, 2003. 978-80-01-06097-1.
11. Design, FRONK. tabulka AWG/mm2 - technická podpora - DDA a.s. *DDA a.s.* [Online] DDA a.s., 2006. http://www.kabelyvodice.cz/technicka-podpora/tech_awg-prurezy.php.

Seznam použitých zkratek a symbolů

u	napětí [V]
R	odpor [Ω]
i	proud [A]
u_i	indukované napětí [V]
Ψ	spřažený magnetický tok [Wb]
t	čas [s]
L	indukčnost [H]
L_o	vlastní indukčnost [H]
x	poloha [m]
N	počet závitů vinutí [-]
μ_o	permeabilita vakua [H/m]
π	matematická konstanta pí [-]
d	šířka mezery, ve které těleso kmitá [m]
a	tloušťka stěny pouzdra [m]
s	vzduchová mezera [m]
l_o	ustálená poloha tělesa [m]
W_{co}	koenergie soustavy [J]
F_m	magnetická síla [N]
F	síla [F]
m	hmotnost [Kg]
b	koeficient viskózního tlumení [Ns/m]
k	tuhost pružiny [N/m]
Ω	úhlová frekvence [rad/s]
Ω_o	vlastní úhlová frekvence [rad/s]
δ	součinitel doznívání [rad/s]
b_r	poměrný útlum [-]
f_v	vlastní frekvence [Hz]

S	průřez vodiče [m^2]
I	proud [A]
J	hustota elektrického proudu [A/m^2]
ρ	měrný elektrický odpor mědi [Ωm]
l_z	délka závitů [m]
r_{Cu}	poloměr obvodu vinutí cívky [m]
b_{Cu}	výška vinutí cívky [m]
S_{Cu}	Plocha průřezu vinutí cívky [m^2]
S_d	Průřez měděného drátu [m^2]
d_d	průměr měděného drátu [m]

Seznam obrázků

Obrázek 1: Řez budičem se stacionárním magnetem (8).....	11
Obrázek 2: Nákres budiče (10).....	14
Obrázek 3: Simulinkový model elektro-magnetické rovnice.....	15
Obrázek 4: Simulinkový model rovnice transformačního napětí.....	15
Obrázek 5: Simulinkový model rovnice pohybového napětí.....	16
Obrázek 6: Simulinkový model rovnice magnetické síly.....	16
Obrázek 7: Dynamický model kmitání s jedním stupněm volnosti (8).....	18
Obrázek 8: Simulinkový model kmitání s jedním stupněm volnosti.....	19
Obrázek 9: Elektro-magnetická část budiče – Matlab.....	22
Obrázek 10: Mechanická část budiče – Matlab.....	22
Obrázek 11: Dupočítávané hodnoty – Matlab.....	22
Obrázek 12: Model budiče v Simulinku.....	23
Obrázek 13: Kód vykreslení amplitudové frekvenční charakteristiky.....	25
Obrázek 14: Kód vykreslení závislosti amplitudy na šířce pásma.....	28
Obrázek 15: Nákres budiče s rozměry v milimetrech.....	37

Seznam grafů

Graf 1: Průběh polohy v čase při frekvenci 28 Hz.....	24
Graf 2: Amplitudová frekvenční charakteristika pro sinusový vstup.....	25
Graf 3: Detail amplitudové frekvenční charakteristiky v okolí 47 Hz.....	26
Graf 4: Detail amplitudové frekvenční charakteristiky v okolí 71 Hz.....	26
Graf 5: Amplitudová frekvenční charakteristika pro pulzní vstup.....	27
Graf 6: Detail amplitudové frekvenční charakteristiky v okolí 49 Hz.....	28
Graf 7: Závislost amplitudy na šířce pásma při 25 Hz.....	29
Graf 8: Závislost amplitudy na šířce pásma při 30 Hz.....	29
Graf 9: Závislost amplitudy na šířce pásma při 35 Hz.....	30
Graf 10: Závislost amplitudy na šířce pásma při 40 Hz.....	30
Graf 11: Průběh proudu pro cívku s 400 závitů.....	31
Graf 12: Výkon v čase pro cívku se 400 závitů.....	32
Graf 13: Průběh proudu pro cívku s 800 závitů.....	32
Graf 14: Amplitudová frekvenční charakteristika pro cívku s 800 závitů.....	33
Graf 15: Výkon v čase pro cívku se 800 závitů.....	33
Graf 16: Průběh proudu v závislosti na čase pro cívku s 1000 závitů.....	34
Graf 17: Amplitudová frekvenční charakteristika pro cívku s 1000 závitů.....	34
Graf 18: Výkon v čase pro cívku s 1000 závitů.....	35
Graf 19: Amplitudová frekvenční charakteristika navrženého budiče.....	38
Graf 20: Detail amplitudové frekvenční charakteristiky v okolí 47 Hz.....	38
Graf 21: Detail amplitudové frekvenční charakteristiky v okolí 69 Hz.....	39
Graf 22: Amplitudová frekvenční charakteristika s přidáním hmotnosti pro model s 400 závitů.....	40

Graf 23: Amplitudová frekvenční charakteristika s přidáním hmotnosti pro model s 1000 závitů	40
--	----

Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry elektrické části budiče	17
Tabulka 2: Rozměry mechanické části budiče	19
Tabulka 3: Parametry mechanické části budiče	20

Seznam příloh

Příloha 1: soubor budic.m obsahující kód pro model budiče v Matlabu
Příloha 2: soubor budic_sim.slx obsahující model budiče v Simulinku