

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Ferorezonance tlumivky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch MICHÁLEK**
Osobní číslo: **E12B0507P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Ferorezonance tlumivky**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište jev ferorezonance.
2. Vypočtete závislost indukčnosti tlumivky na jejím budicím proudu.
3. Změřte ferorezonanci tlumivky s kondenzátorovou baterií.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

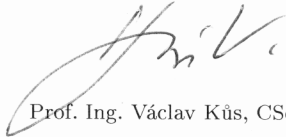
- 1. MAYER, D.; POLÁK, J.: Metody řešení elektrických a magnetických polí**
- 2. BAŠTA, J.; CHLÁDEK, J.; MAYER, I.: Teorie elektrických strojů**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Karel Hruška, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na popis jevu ferorezonance v sériovém obvodu s nelineární indukčností a kapacitou. Uvedeny jsou zde typy ferorezonance a závislosti vystihující její chování. V práci je stručně popsána identifikace a předcházení vzniku ferorezonance. Součástí práce je měření na obvodu tvořeném samotnou tlumivkou a sériovým spojením tlumivky a kondenzátorové baterie. Výstupem měření samotné tlumivky je závislost indukčnosti na budícím proudu. Z této závislosti je výpočtem získána voltampérová charakteristika modelu sériového ferorezonančního obvodu, která je následně porovnána s charakteristikou skutečného obvodu.

Klíčová slova

ferorezonance, nelineární indukčnost, sériový, charakteristika, závislost

Abstract

This bachelor thesis is focused on the description of the phenomenon of ferroresonance in series circuit with nonlinear inductance and capacitance. Listed here are the types of ferroresonance and dependence reflects its behavior. The paper briefly describes the identification and prevention of ferroresonance. Part of this work is to measure the circuit formed by the choke itself and serial connection choke and capacitor. The output of measurement itself is inductors inductance dependence on excitation current. From this dependence is obtained by calculating current-voltage characteristic of the model serial ferroresonant circuit, which is then compared with the actual characteristics of the circuit.

Key words

ferroresonance, nonlinear inductance, serial, characteristics, dependence

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 29.7.2013

Vojtěch Michálek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Karlovi Hruškovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vedení práce. Moje poděkování patří také katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky FEL ZČU v Plzni za zapůjčení měřících přístrojů a poskytnutí prostoru k měření.

Obsah

Seznam symbolů a zkratek.....	8
1 Úvod.....	12
2 Tlumivka.....	13
2.1 Odrušovací tlumivky.....	14
2.2 Filtrační tlumivky.....	15
3 Rezonance.....	16
3.1 Sériový rezonanční obvod.....	16
4 Ferorezonance.....	18
4.1 Popis idealizovaného sériového ferorezonančního obvodu.....	19
4.2 Charakteristiky ferorezonance.....	22
4.2.1 Voltampérová charakteristika.....	22
4.2.2 Převodní charakteristika.....	23
4.2.3 Citlivost na počáteční podmínky.....	25
4.3 Zařazení druhů ferorezonance.....	25
4.3.1 Fundamentální typ.....	26
4.3.2 Subharmonický typ.....	26
4.3.3 Kvaziperiodický typ.....	27
4.3.4 Chaotický typ.....	27
4.4 Podmínka periodické ferorezonance.....	28
4.5 Identifikace ferorezonance.....	29
4.6 Příklady obvodů náchylných k ferorezonanci.....	30
4.7 Předcházení vzniku ferorezonance.....	31
4.8 Příklad ničivého účinku ferorezonance.....	32
5 Měření na ferorezonančním obvodu.....	33
5.1 Měřící obvod.....	34
5.2 Naměřené hodnoty.....	35
5.3 Postup výpočtu modelu sériového ferorezonančního obvodu.....	37
5.3.1 Efektivní hodnota napětí a proudu.....	37
5.3.2 Výkon.....	39
5.3.3 Vlastní indukčnost tlumivky.....	40
5.3.4 Celkové napětí.....	40
5.4 Numerické řešení modelu sériového ferorezonančního obvodu.....	41
5.4.1 Efektivní hodnota napětí a proudu.....	41
5.4.2 Výkon.....	43
5.4.3 Celkové napětí.....	43
5.5 Postup výpočtu a numerické řešení sériového ferorezonančního obvodu.....	44
5.5.1 Reaktance a celkové napětí sériového ferorezonančního obvodu.....	44
5.5.2 Numerické řešení sériového ferorezonančního obvodu.....	45
5.6 Grafický výstup numerického řešení.....	46
5.6.1 Závislost indukčnosti tlumivky na jejím budícím proudu.....	46
5.6.2 Voltampérová charakteristika modelu sériového ferorezonančního obvodu.....	47
5.6.3 Závislost reaktance sériového ferorezonančního obvodu na proudu.....	48
5.6.4 Voltampérová charakteristika sériového ferorezonančního obvodu.....	48
5.7 Příklad ferorezonančního stabilního stavu.....	49
6 Závěr.....	51
Seznam použité literatury a informačních zdrojů.....	52
Přílohy.....	1

Seznam symbolů a zkratk

C	kapacita	[F]
C	křivka nestabilního stavu S_{2a}	-
c	kapacita kondenzátorové baterie	[F]
$efkonst$	konstanta převodu na ef. hodnoty	-
f	frekvence zdroje	[Hz]
f_0	rezonanční frekvence	[Hz]
f_0	frekvence základní harmonické složky	[Hz]
f_1	frekvence harmonické složky jedna	[Hz]
f_2	frekvence harmonické složky dva	[Hz]
I	ef. hodnota elektrického proudu	[A]
I	matice amplitud proudu	-
Ie	matice ef. hodnot proudu	-
I_h	ef. hodnota vyšších harmon. proudu	[A]
I_m	amplituda proudu	[A]
$I_{m(n)}$	amplituda harmonické složky proudu	[A]
I_{max}	maximální proud	[A]
I_s	stejnoseměrná složka proudu	[A]
I_z	efektivní hodnota proudu základní vlny	[A]
i	okamžitá hodnota proudu	[A]
i	vektor ef. hodnot proudu	-
ih	vektor ef. hodnot vyšších harm. proudu	-
is	vektor stejnosměrných složek proudu	-
iz	vektor ef. hodnot proudu zákl. vlny	-
L	vlastní indukčnost	[H]
L	vložný útlum	[dB]
L_{lin}	vlastní indukčnost v lineární části	[H]
L_{sat}	vlastní indukčnost v saturační části	[H]
l	vektor vlastní indukčnosti	-
m	celé číslo	-
n	celé číslo, přiroz. číslo, řád harm. složky	-
P	činný výkon	[W]
P_d	deformační výkon	[VAd]
p	vektor činného výkonu	-
pd	vektor deformačního výkonu	-
$pom, poml$	pomocné proměnné num. výpočtu	-
Q	činitel jakosti	-

Q	celkový jalový výkon	[VAr]
Q_1	jalový výkon základní vlny	[VAr]
\mathbf{q}	vektor jalového výkonu	-
$\mathbf{q1}$	vektor jalového výkonu zákl. vlny	-
R	elektrický odpor	[Ω]
R_P	předřadný odpor	[Ω]
R_{vin}	odpor vinutí	[Ω]
r	odpor vinutí tlumivky	[Ω]
S_{01}	nastávající stabilní stav jedna	-
S_{02}	nastávající stabilní stav dva	-
S_1	zdánlivý výkon základní vlny	[VA]
S_1	ferorezonanční stav přechodu řešení	-
S'_1	normální stav přechodu řešení	-
S_{1n}	normální stav	-
S_2	normální stav přechodu řešení	-
S'_2	ferorezonanční stav přechodu řešení	-
S_{2a}	nestabilní stav	-
S_{2f}	ferorezonanční stav	-
S_{2n}	normální stav	-
S_{3f}	ferorezonanční stav	-
\mathbf{s}	vektor zdánlivého výkonu	-
$\mathbf{s1}$	vektor zdánlivého výkonu zákl. vlny	-
T	perioda	[s]
\mathbf{T}	vstupní matice	-
t	čas	[s]
t_0	počáteční okamžik při U_0	[s]
t_1	okamžik při napětí U_1 a Φ_{sat}	[s]
t_2	okamžik při U_1 a Φ_{sat}	[s]
t_3	okamžik při $-U_2$ a $-\Phi_{sat}$	[s]
U	efektivní hodnota elektrického napětí	[V]
\bar{U}	fázor napětí	[V]
\mathbf{U}	matice amplitud napětí	-
U_0	počáteční napětí	[V]
U_1	nap. úroveň v čase t_1 , celkové napětí	[V]
U_2	napěťová úroveň, napětí na výst. filtru	[V]
U_{20}	napětí naprázdno	[V]
U_C	napětí na kapacitě	[V]

\bar{U}_C	fázor napětí na kapacitě	[V]
U_{C0}	napětí na kapacitě v rezonanci	[V]
U_L	napětí na indukčnosti	[V]
\bar{U}_L	fázor napětí na indukčnosti	[V]
U_{L0}	napětí na indukčnosti v rezonanci	[V]
Ue	matice ef. hodnot napětí	-
U_R	napětí na odporu	[V]
\bar{U}_R	fázor napětí na odporu	[V]
U_m	amplituda zdroje napětí	[V]
$U_{m(n)}$	amplituda harmonické složky napětí	[V]
U_{m1}	amplituda napětí normálního stavu	[V]
U_{m2}	amplituda napětí tří stavů	[V]
U'_{m2}	amplituda napětí při přechodu řešení	[V]
U''_{m2}	amplituda napětí při přechodu řešení	[V]
U_{m3}	amplituda napětí při ferorezonanci	[V]
u	okamžitá hodnota napětí	[V]
u	vektor ef. hodnot napětí	-
u1	vektor celkového napětí	-
uc	vektor napětí na kapacitě	-
uh	vektor ef. hodnot vyšších harm. napětí	-
ul	vektor napětí na indukčnosti tlumivky	-
ur	vektor napětí na odporu	-
ux	vektor napětí na reaktanci měř. obvodu	-
uz	vektor ef. hodnot napětí zákl. vlny	-
X	reaktance měřeného obvodu	[Ω]
X_C	kapacitní reaktance	[Ω]
X_L	induktivní reaktance	[Ω]
X_{L-lin}	induktivní reaktance v lineární části	[Ω]
X_{L-sat}	induktivní reaktance v saturační části	[Ω]
x	vektor reaktance měřeného obvodu	-
xc	kapacitní reaktance	[Ω]
xl	vektor indukční reaktance	-
Z	impedance	[Ω]
Z_S	vnitřní impedance sítě	[Ω]
Z_Z	vstupní impedance napájení	[Ω]
$\Delta\Phi$	přírůstek magnetického toku	[Wb]
π	Ludolfovo číslo	-

Φ	magnetický tok	[Wb]
Φ_{sat}	saturační magnetický tok	[Wb]
Φ_{max}	maximální magnetický tok	[Wb]
ω	úhlová frekvence	[rad.s ⁻¹]
ω_0	rezonanční úhlová frekvence obvodu	[rad.s ⁻¹]
ω_1	úhlová frekvence oscilace jedna	[rad.s ⁻¹]
ω_2	úhlová frekvence oscilace dva	[rad.s ⁻¹]
ω_n	úhlová frekvence zdroje	[rad.s ⁻¹]
CVT	kapacitní napěťový transformátor	-
HVDC	vysoké stejnosměrné napětí	-
CH1	kanál osciloskopu jedna	-
CH2	kanál osciloskopu dva	-
K	spínač	-
LC	filtrační obvod	-
V-A	voltampérová	-
SST	staniční servisní transformátor	-

V textu této bakalářské práce jsou fázory tisknuty kurzívou velkého písma s nadtržením, matice velkým polotučným písmem, vektory malým polotučným písmem a zkratky obyčejným velkým písmem. Pro veličiny a konstanty je použita kurzíva.

1 Úvod

První publikovaná práce zaměřená na ferorezonanci vznikla v roce 1907 a zabývá se rozbořem rezonancí na transformátorech. Práce nese název „Sur le Transformateur à Résonance“. V této publikaci ještě nebylo uvedeno označení ferorezonance. Autorem této práce byl Joseph Bethenod. Jako první použil slovo ferorezonance francouzský inženýr Paul Boucherot ve svém díle „Éxistence de Deux Régimes en Ferrorésonance“ v roce 1920. Toto dílo bylo zaměřeno na popis rezonance v sériovém rezonančním obvodu s nelineární indukčností. Dnes je ferorezonance více než sto let zkoumaným jevem v napájecích systémech obsahujících kapacitu, sycenou indukčnost a malé ztráty. [12]

V moderních napájecích systémech se nachází velké množství přesytitelných indukčností a různých kapacit. Napěťovými zdroji v napájecích systémech jsou generátory, které mají malý vnitřní odpor. [5]

Základními vlastnostmi systémů, u nichž může k ferorezonanci dojít, jsou saturovatelná indukčnost, kapacita a malé ztráty. Těmito třemi vlastnostmi disponují energetické distribuční systémy, u kterých často dochází k ferorezonanci. [12]

Ferorezonance může způsobit zkreslení napětí v síti (podpětí nebo přepětí). Tím se mohou poškodit elektrická zařízení připojená na síť. Napětí zkreslené vlivem ferorezonance závisí nejen na napětí zdroje a ztrátách systému, ale i na nelineární indukčnosti. Zkreslené mohou být napěťové, ale také proudové vlny. [10]

Pro dané parametry nelineárního dynamického systému může existovat více stabilních stavů. Tyto systémy jsou citlivé na počáteční podmínky určující nastávající stabilní stav. V pozdějším textu jsou popsány čtyři stabilní stavy, dva periodicky se opakující a dva neperiodické. [10]

Výzkumem ferorezonance jsou stanoveny možné konfigurace systémů, při kterých k tomuto jevu dochází. Takovým konfiguracím je nutné se vyhýbat. Také některé situace, ve kterých systém inklinuje k ferorezonanci, jsou již známé. Ke složitým, téměř neřešitelným situacím patří přechodové jevy ve ferorezonančních obvodech. Kvůli tomu jsou popisovány hlavně ustálené stavy ferorezonance.

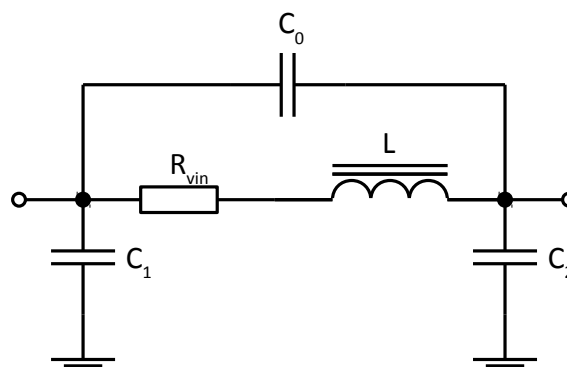
V historii distribuce elektrické energie nastalo již mnoho poruch na energetických systémech spojených s ferorezonancí. Existuje několik možností předcházení vzniku ferorezonance.

2 Tlumivka

Tlumivka je induktor ze silného drátu navinutého na feromagnetickém jádře. Tlumivky jsou řazeny k transformátorům. Mají podobný vzhled jako malé transformátory, ale pouze se dvěma vystupujícími vodiči. Nejde u nich však o princip transformace napětí, protože mají pouze jedno vinutí. Tlumivky mívají zpravidla feromagnetické jádro u zařízení s technickým kmitočtem 50 Hz, které může být přerušeno mezerami neferomagnetických vložek. Tyto mezery zabráňují přesycení železa a také se jimi nastavuje reaktance tlumivky. Tlumivky mohou být využity pro tlumivkové řízení, kde se vložkami omezují vyrovnávací proudy u říditelných transformátorů. Tlumivka je používána také jako přídatná reaktance zlepšující paralelní chod transformátorů s různými u_k . [1,8]

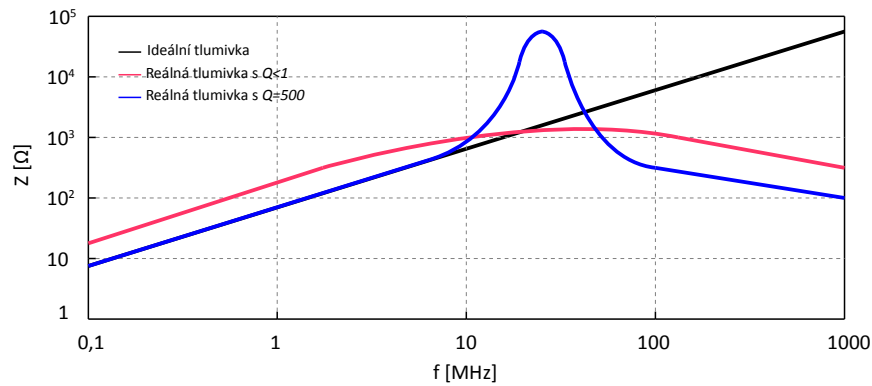
Tlumivky jsou používány jako pasivní prvky blokující vyšší harmonické složky proudu v obvodu střídavého proudu. Reaktance tlumivky se zvyšuje s rostoucí frekvencí. Vlastní indukčnost tlumivky L je poměrně velká, ale odpor vinutí R_{vin} je malý. [8]

Hlavním a žádoucím parametrem tlumivky je indukčnost L , ovšem přítomny jsou také parazitní parametry. Každá tlumivka tedy vykazuje ztrátový odpor vinutí R_{vin} a parazitní kapacitu C mezizávitovou, vůči jádru a zemi. Tyto parazitní parametry tvoří rezonanční obvod vykazující nad rezonančním kmitočtem kapacitní charakter. [11]



Ilustrace 1: Náhradní schéma tlumivky [11]

Podstatným parametrem tlumivky je její *činitel jakosti* Q . Na ilustraci 2 jsou vyneseny kmitočtové charakteristiky ideální tlumivky a dvou reálných tlumivek s různým činitelem jakosti. Z charakteristik lze zjistit, že ideální tlumivka má stále induktivní charakter. Reálné tlumivky za rezonančním kmitočtem získávají kapacitní charakter. Tlumivky s nízkým činitelem jakosti se projevují za rezonančním kmitočtem téměř jako kmitočtově závislý odpor. Tlumivky s nízkým činitelem jakosti mají větší odpor vinutí R_{vin} . [11]



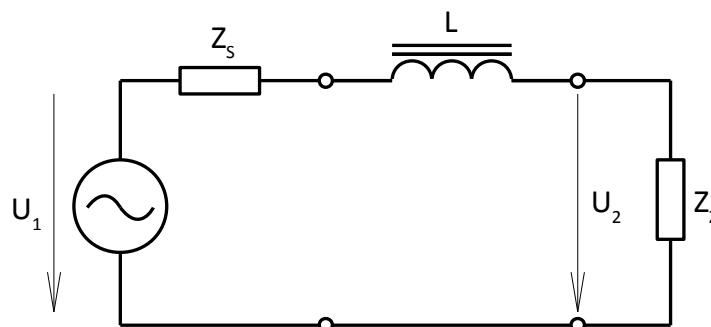
Ilustrace 2: Závislost impedance na kmitočtu ideální a reálné tlumivky [10]

Tlumivky mají v elektrotechnice řadu možností použití, s čímž souvisí jejich typ. Ze širokého spektra jejich uplatnění jsou dále uvedeny dva příklady.

2.1 Odrušovací tlumivky

Odrušovací tlumivky jsou využívány v odrušovací technice, kde tvoří nejobemnější a nejnákladnější prvky. Jejich rozměry jsou dány protékajícím provozním proudem, zapojují se přímo do proudových obvodů odrušovaného zařízení. Tyto tlumivky pracují buď samostatně nebo jsou součástí odrušovacích filtrů. [11]

Odrušovací tlumivka je zapojena do série s vnitřní impedancí sítě Z_S a vstupní impedancí napájecího vstupu přístroje Z_Z . Toto zapojení je na ilustraci 3. [11]

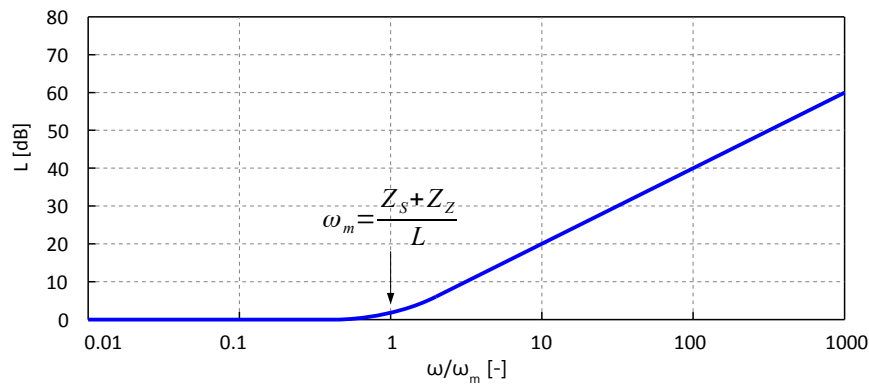


Ilustrace 3: Zapojení odrušovací tlumivky do vedení [11]

Základním parametrem jednovrstvého tlumivkového filtru je *vložný útlum*, udávaný v decibelech:

$$L = 20 \cdot \log \left| \frac{U_{20}}{U_2} \right| = 20 \cdot \log \left| 1 + \frac{j \omega L}{Z_S + Z_Z} \right| \quad [\text{dB}], \quad (1)$$

kde U_2 je napětí na výstupu filtru a U_{20} je stejné napětí bez přítomnosti filtru. Kmitočtový průběh vložného útlumu je na ilustraci 4. [11]



Ilustrace 4: Kmitočtový průběh vloženého útlumu [11]

Hlavní význam pro elektrické vlastnosti tlumivky v odrušovacím obvodu skýtají její parazitní parametry. Odrušovací tlumivka by měla mít vlastnosti:

- co nejmenší činitel jakosti ($Q < 1$),
- vysoký vlastní rezonanční kmitočet,
- nemělo by docházet k přesycování jádra tlumivky při průchodu pracovního proudu,
- co největší vlastní indukčnost L při nejmenším možném počtu závitů. [11]

Existuje mnoho typů tlumivek pro odrušovací techniku daných typem odrušovaného zařízení a účelem jejich použití. [11]

2.2 Filtrační tlumivky

Tlumivka se používá v elektrických obvodech jako filtrační prvek napájení. Obecně proud induktorem je stavová veličina, jenž se nemůže měnit skokem. Induktor se tedy snaží proud jím procházející zachovat nezměněný, a tím vyhlazuje usměrněné napětí. Tlumivka je využívána namísto sériového rezistoru jako filtrační prvek, protože tlumivka umožňuje lepší filtraci a menší úbytek napětí než rezistor. Se zvyšujícím se kmitočtem roste induktivní reaktance tlumivky X_L eliminující vyšší harmonické složky proudu, tedy i napětí. Tím se snižuje úroveň napěťového zkreslení, ale také se eliminací vyšších harmonických složek snižuje celková hodnota napětí. Filtrační tlumivky jsou určeny především pro síť nízkého napětí. [7,8]

Filtrační tlumivky mají feromagnetické jádro s dvojitou vzduchovou mezerou a měděné vinutí. Izolace vinutí je zařazena v určité tepelné třídě. Filtrační tlumivky jsou vakuově impregnovány¹ a jsou vybaveny vratnou tepelnou pojistkou. [7]

Stejně jako odrušovací tlumivky se filtrační tlumivky zapojují do série se zátěží nebo jsou součástí LC filtrů, kde tvoří sériový rezonanční obvod. LC filtry mají schopnost potlačit vznik vyšších harmonických složek proudu a napětí v různých zařízeních připojených na síť, což má za následek vyšší jakost síťového napětí. [7]

3 Rezonance

Rezonance je jev nastávající v tzv. rezonančních obvodech, které při tomto jevu vykazují buď minimální nebo maximální impedanci. Tyto obvody jsou tvořeny ideálním odporem, ideální indukčností a ideální kapacitou, tedy pasivními prvky. Reálná cívka sestává z ideální indukčnosti a ideálního odporu. Ohmické ztráty reálného kondenzátoru jsou zanedbatelné (výjimku tvoří elektrolytické kondenzátory) a tudíž ho lze považovat za ideální. Rezonanční obvod může být tvořen sériovým nebo paralelním spojením reálné cívky a reálného kondenzátoru. Jak sériový tak paralelní rezonanční obvod je frekvenčně závislý. Jev rezonance nastává při tzv. rezonanční frekvenci. [2]

K rezonanci dochází na zařízeních všech napěťových úrovní. Rezonance může způsobit zrychlené stárnutí izolace vlivem přepětí nebo nadproudu a dokonce dielektrické nebo termální zničení elektrických zařízení. Harmonická rezonance by měla být kontrolována, protože může mít degradační účinky na elektrická zařízení. Tento jev se objevuje například v systému používaném k omezení zemních poruchových proudů v jedné fázi transformátoru (Petersonova tlumivka). [6]

3.1 Sériový rezonanční obvod

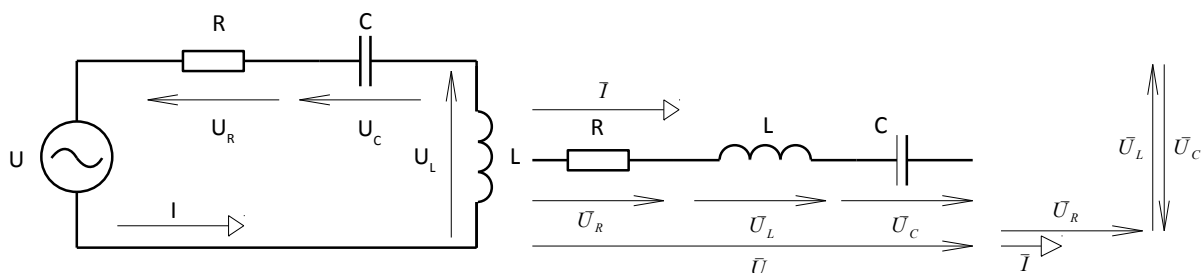
Sériový rezonanční obvod je tvořen sériovým spojením reálné cívky a reálného kondenzátoru. Obvod je napájen zdrojem harmonického napětí

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega_n t) \quad [\text{V}]. \quad (2)$$

Celkové napětí je dáno jako vektorový součet napětí na prvcích R , L a C :

$$\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C \quad [\text{V}]. \quad (3)$$

1 *Vakuová impregnace* je část výrobního procesu, při němž je vinutí stroje napuštěno impregnačním lakem.



Ilustrace 5: RLC sériový obvod

V celkové impedanci Z obvodu se uplatňují ohmické ztráty reálné cívky, indukční a kapacitní reaktance:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad [\Omega]. \quad (4)$$

Při rezonanční frekvenci f_0 dochází ke koincidenci induktivní a kapacitní reaktance ($X_L = X_C$), tedy napětí na indukčnosti U_L je stejně velké jako napětí na kapacitě U_C . Protože obě napětí jsou navzájem opačného směru, jejich součtem je nulové napětí. Celkové napětí při sériové rezonanci je pouze napětí na odporu a je ve fázi s proudem protékajícím obvodem. Impedance sériového obvodu v rezonanci je minimální a je rovna pouze odporu, proto výsledný proud může nabývat značných hodnot:

$$I_m = \frac{U_m}{R} \quad [\text{A}; \text{V}, \Omega]. \quad (5)$$

Rezonanční frekvenci vyjadřuje relace známá jako *Thompsonův vzorec*:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [\text{Hz}; \text{H}, \text{F}]. \quad (6)$$

Fázorový diagram na ilustraci 5 zobrazuje chování sériového rezonančního obvodu v rezonanci. [2,6]

V sériovém rezonančním obvodě může dojít při rezonanci k nebezpečně vysokým napětím na indukčnosti a na kapacitě. Tato napětí jsou dána součinem *činitele jakosti* Q s amplitudou zdroje:

$$U_{L0} = U_{C0} = Q \cdot U_m \quad [\text{V}; \text{V}; -, \text{V}], \quad (7)$$

kde U_{L0} a U_{C0} jsou napětí na indukčnosti a kapacitě v rezonanci. Téměř celá velikost činitele jakosti odpovídá jakosti reálné cívky, jelikož ohmické ztráty reálného kondenzátoru jsou zanedbatelné. Činitel jakosti je vyjádřen vztahem:

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad [-; -, \text{H}, \Omega]. \quad (8)$$

Napětí na indukčnosti a kapacitě sériového rezonančního obvodu mohou být i Q -krát menší než amplituda zdroje U_m . [6]

V sériovém rezonančním obvodu nastává harmonická rezonance v okamžiku rovnosti úhlové frekvence zdroje ω_n s harmonickou frekvencí $n\omega_0$ (ω_0 je rezonanční úhlová frekvence obvodu) vytvořené některými zařízeními (např. frekvenčními měniči). [6]

4 Ferorezonance

Ferorezonance je případ rezonance v obvodu s nelineární indukčností. Indukční reaktance v takovém obvodu závisí nejen na frekvenci, ale i na magnetickém toku feromagnetického jádra cívky. [12]

Společnými vlastnostmi obvodů náchylných k ferorezonanci jsou:

- nelineární nasycitelná indukčnost (např. transformátor, tlumivka),
- kapacita,
- malé ztráty,
- napěťový zdroj. [9]

Mezi ferorezonančním (nelineárním) obvodem a rezonančním lineárním obvodem jsou jisté rozdíly:

- k rezonanci dochází ve velkém rozsahu kapacit,
- napěťové i proudové vlny mohou mít jiný kmitočet než je kmitočet harmonického zdroje,
- může nastat několik stabilních stavů vztažených k parametrům systému; jeden stabilní stav je stejný jako u lineárního rezonančního obvodu, ostatní stabilní stavy jsou dány nelinearitou obvodu. [6]

Nastávající stabilní stav ferorezonance je inicializován počátečními podmínkami systému. Ferorezonanční obvod je velmi citlivý na následující počáteční podmínky:

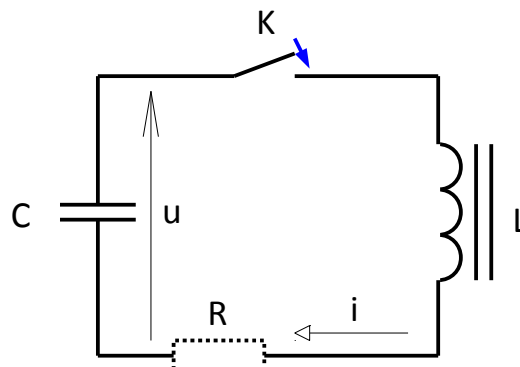
- remanentní magnetizace feromagnetického jádra tlumivky (transformátoru),
- napětí harmonického zdroje v okamžiku sepnutí,

- počáteční nabití kondenzátoru. [10]

I malé rozdíly v těchto počátečních podmínkách mohou vést k úplně odlišným napěťovým i proudovým průběhům. [10]

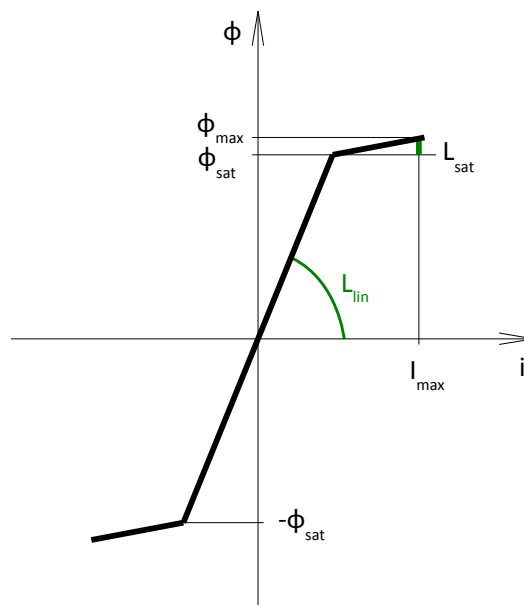
4.1 Popis idealizovaného sériového ferorezonančního obvodu

Obvod na ilustraci 6 je idealizované sériové spojení nelineární indukčnosti a kapacity. Ohmické ztráty v obvodu jsou zanedbané. Napětí na kapacitě je rovno U_0 . [6]



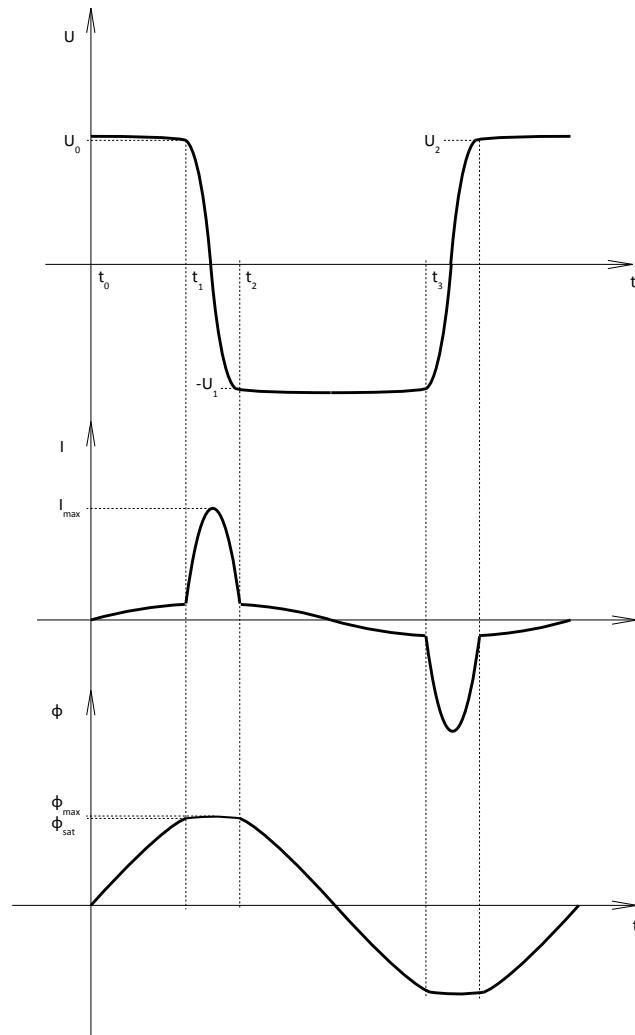
Ilustrace 6: Idealizovaný sériový rezonanční obvod [6]

Zjednodušená magnetizační křivka feromagnetického jádra cívky je zobrazena na ilustraci 7.



Ilustrace 7: Zjednodušená charakteristika $\Phi(i)$ [6]

Přestože je tento sériový ferorezonanční obvod zjednodušený, průběhy napětí, proudu a magnetického toku na ilustraci 8 odpovídají typické periodické ferorezonanci. [6]



Ilustrace 8: Průběhy napětí, proudu a magnetického toku [6]

Spínač K je sepnut v čase t_0 a obvodem začne protékat proud. V průběhu proudu vznikne oscilace

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{lin} C}} \quad [\text{rad.s}^{-1}; \text{H, F}]. \quad (9)$$

Napětí na svorkách kondenzátoru U je dáno vztahem

$$u(t) = U_0 \cdot \cos \omega_1 t \quad [\text{V}; \text{V, rad.s}^{-1}, \text{s}]. \quad (10)$$

Integrací napětí na kondenzátoru je vyjádřen magnetický tok cívky

$$\Phi = \frac{U_0}{\omega_1} \cdot \sin \omega_1 t \quad [\text{Wb}; \text{V, rad.s}^{-1}, \text{rad.s}^{-1}, \text{s}]. \quad (11)$$

Jestliže amplituda magnetického toku převyšuje saturační tok ($(U_0/\omega_1) > \Phi_{sat}$), magnetický tok Φ dosahuje v čase t_1 saturačního toku Φ_{sat} . Napětí nabývá hodnoty U_1 . U cívky dochází k nasycení jádra a její indukčnost má velikost L_{sat} . Indukčnost v nasyceném stavu L_{sat}

je mnohem menší než indukčnost v lineárním stavu L_{lin} . V tomto čase t_1 dochází k vybití kondenzátoru přes cívku ve formě oscilace

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_{sat} C}} \quad [\text{rad.s}^{-1}; \text{H, F}]. \quad (12)$$

Maximální hodnoty proudu a magnetického toku jsou v okamžiku ekvivalence elektromagnetické energie uložené v cívce $\left(\frac{1}{2}\right) \cdot LI^2$ s elektrostatickou energií uloženou v kondenzátoru $\left(\frac{1}{2}\right) \cdot CU_1^2$. [6]

V čase t_2 má magnetický tok opět hodnotu Φ_{sat} . Indukčnost získává hodnotu L_{lin} . Napětí je opačné polarity $-U_1$, přičemž jsou zanedbány ztráty v obvodě. [6]

V čase t_3 dosahuje magnetický tok hodnoty $-\Phi_{sat}$ a napětí je rovno $-U_2$. Frekvence ω_1 je reálně malá, proto je možno považovat napětí za stejně velká $(U_2 \approx U_1 \approx U_0)$. [6]

Perioda oscilace T je rovna v nenasyčeném případě $2\pi\sqrt{L_{lin}C}$ a v nasyceném případě $2\pi\sqrt{L_{sat}C} + 2(t_3 - t_2)$, kde $t_3 - t_2 \approx 2\Phi_{sat}/U_0$. Frekvence f ($f = 1/T$) je dána v rozmezí

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{lin}C}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{sat}C}} \quad [\text{H, F}; \text{Hz}; \text{H, F}]. \quad (13)$$

Jedná se o počáteční frekvenci závisující na saturačním toku Φ_{sat} (nelinearitě) a počátečním napětí U_0 . [6]

Reálně klesá amplituda napětí U ($U_2 < U_1 < U_0$) kvůli ohmickým ztrátám (Ri^2) hlavně při změnách polarity napětí. Přírůstek magnetického toku $\Delta\Phi$ je dán jako integrál napětí v mezích doby nenasyčení $(t_3 - t_2)$

$$\Delta\Phi = 2\Phi_{SAT} = \int_{t_2}^{t_3} u(t) dt \quad [\text{Wb}; \text{Wb}; \text{V}]. \quad (14)$$

Z toho vyplývá, že snížení napětí $u(t)$ vede ke snížení frekvence. Do obvodu mohou být dodávány ztráty napěťovým zdrojem (Joulovy ztráty, ztráty v železe, atd.). Pak frekvence oscilací postupně klesá až na frekvenci zdroje. To platí, pokud je počáteční frekvence větší než frekvence napájení. Jestliže je počáteční frekvence oscilací menší než frekvence napájení, může se ustálit na násobku frekvence zdroje. Na rozdíl od lineární rezonance může k ferorezonanci dojít při dané nelineární indukčnosti pro široký rozsah kapacity C . [6]

4.2 Charakteristiky ferorezonance

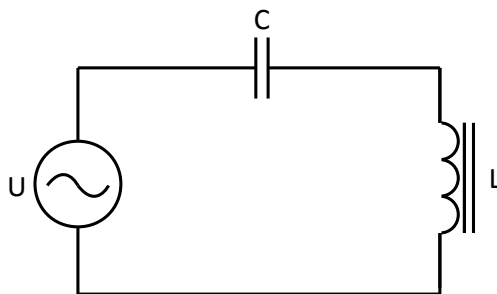
V této části práce jsou uvedeny tři druhy závislostí charakterizující stavy ferorezonance. Jedna ze závislostí je pak počítána z naměřených hodnot v praktické části.

4.2.1 Voltampérová charakteristika

V-A charakteristiku cívky s feromagnetickým jádrem, která vychází z tvaru saturační křivky, je možné rozdělit na dvě části. V první, lineární části se uplatňuje lineární indukčnost L_{lin} . Ve druhé, nelineární neboli saturační části nastává indukčnost při saturaci L_{sat} . Teoreticky nelineární indukčnost může být popsána dvěma indukčními reaktancemi podle umístění na saturační křivce:

- lineární část, kdy $X_{L-lin} = \omega L_{lin}$,
- saturační část, kdy $X_{L-sat} = \omega L_{sat}$. [12]

Na ilustraci 9 je schéma sériového ferorezonančního obvodu, který je analyzován.



Ilustrace 9: Sériový ferorezonanční obvod [12]

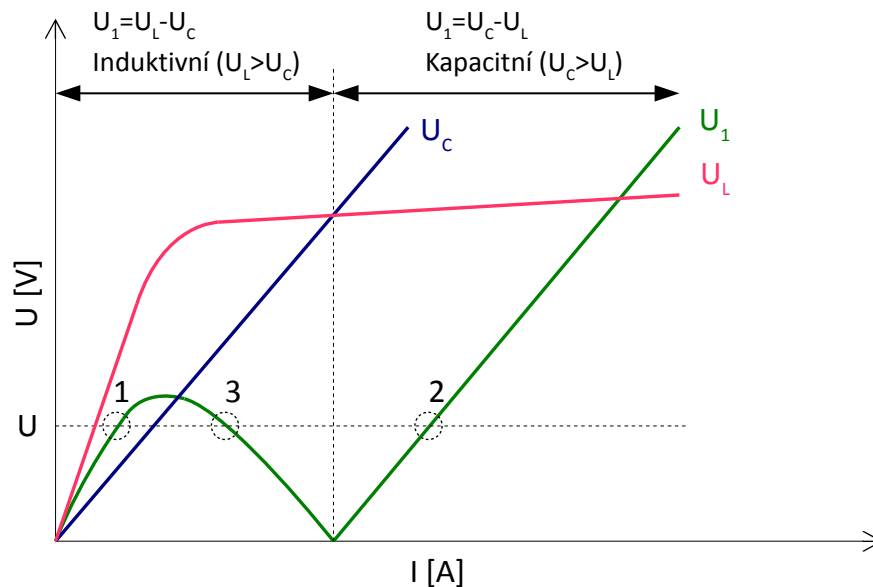
Napětí na kapacitě v sériovém ferorezonančním obvodu má lineární závislost na proudu. Napětí na nelineární indukčnosti je dáno saturační křivkou cívky s feromagnetickým jádrem. V-A charakteristiky kapacity a nelineární indukčnosti jsou vyneseny do jednoho grafu, kde jsou sečteny ve výsledné napětí U_1 . Pro jednu hladinu napětí U mohou nastat tři provozní stavy:

- bod 1 je stabilním stavem, kdy nedochází k ferorezonanci a obvod má induktivní charakter ($X_{L-lin} > X_C \Rightarrow U_1 = U_L - U_C$),
- v bodě 2 nastává ferorezonanční stabilní stav, v němž má obvod kapacitní charakter ($X_{L-sat} < X_C \Rightarrow U_1 = U_C - U_L$),

- bod 3 je nestabilním stavem. [12]

Sériový ferorezonanční obvod má tedy nejméně dva stabilní provozní stavy. Náhlé skoky napětí nebo proudu mohou způsobit přechod z jednoho stabilního stavu do druhého. [12]

Na ilustraci 10 jsou V-A charakteristiky sériového ferorezonančního obvodu, kde jsou vidět všechny tři body stavů obvodu.

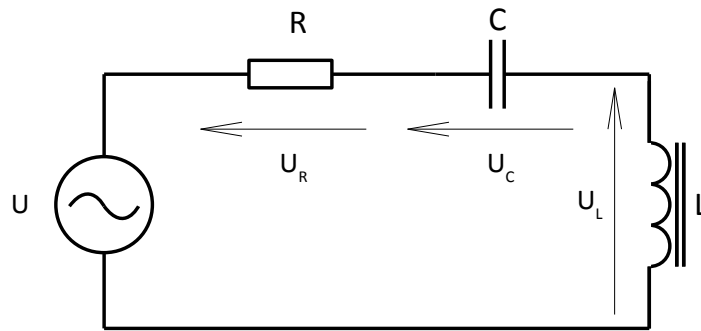


Ilustrace 10: Grafické řešení sériového ferorezonančního obvodu [12]

Jaký vznikne ve výsledku provozní stav závisí na počátečních podmínkách (nabití kondenzátoru, remanentní magnetizace jádra, napětí zdroje v okamžiku sepnutí, atd.). Za určitých počátečních podmínek (přechodné přepětí) může však dojít ke vzniku ferorezonance, při níž nastane přepětí či nadproud. Ferorezonance se v obvodě udrží v případě schopnosti napěťového zdroje dodávat potřebnou energii. Napěťový zdroj musí pro udržení ferorezonance pokrývat ztráty v obvodu. [6,10,12]

4.2.2 Převodní charakteristika

Převodní charakteristika, zobrazená na ilustraci 12, je závislost maximálních hodnot napětí nelineární indukčnosti U_L na maximálních hodnotách napětí harmonického napájecího zdroje U_m . Tato závislost vykresluje křivku zachycující chování ferorezonančního obvodu (viz ilustrace 11), a to citlivost na parametry obvodu a na skokový jev. [6]

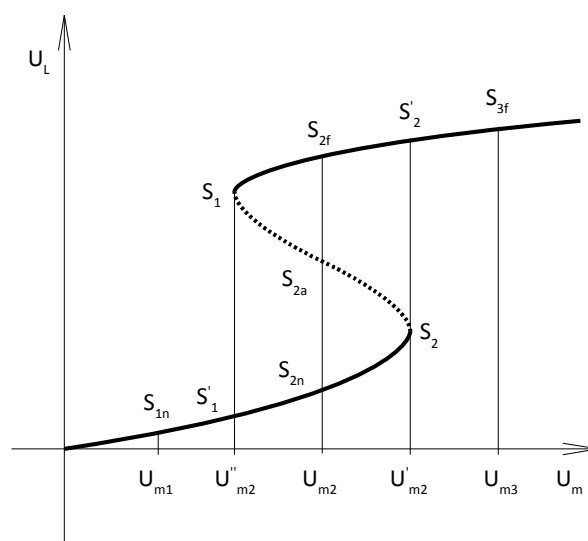


Ilustrace 11: Základní ferorezonanční obvod [6]

V sériovém ferorezonančním obvodu je postupně zvyšována maximální hodnota napětí U_m od nuly. Výsledkem jsou tři možné typy chování závislé na hodnotě U_m a na skokovém jevu:

- Jestliže $U_m = U_{m1}$, existuje pouze jeden normální stav, kdy nedochází k ferorezonanci (lineární část V-A charakteristiky nelineární indukčnosti).
- Jestliže $U_m = U_{m2}$, existují tři možná řešení, a to S_{2n} , S_{2a} a S_{2f} . Dva stavy S_{2n} a S_{2f} jsou stabilní, S_{2n} je normální stav a S_{2f} je ferorezonanční stav, a jeden nestabilní S_{2a} . V čárkované části převodní charakteristiky leží pouze nestabilní stavy.
- Jestliže $U_m = U_{m3}$, existuje jen ferorezonanční stav S_{3f} .
- Při snižování amplitudy U_m z hodnoty U_{m3} dochází při amplitudě U''_{m2} k přechodu řešení z bodu S_1 do bodu S'_1 . [6]

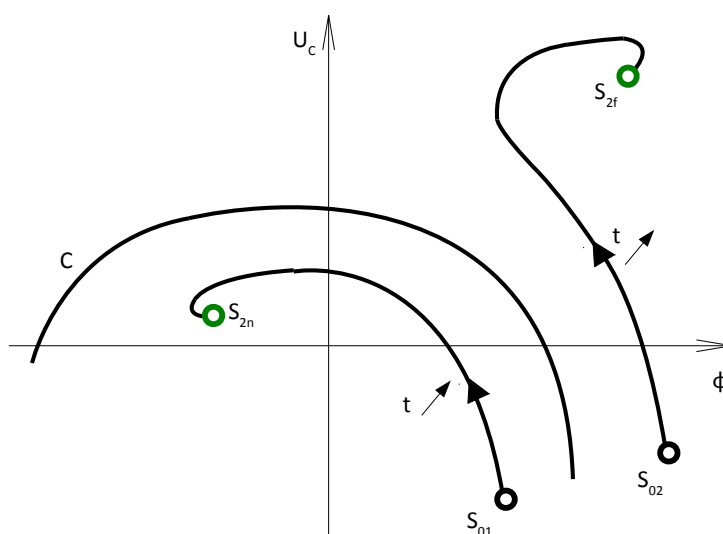
Pro ferorezonanci je charakteristický skokový jev, který lze vyvolat mimo jiné změnou parametrů obvodu (např. změnou odporu nebo kapacity). [6]



Ilustrace 12: Citlivost na parametry systému a na skokový jev [6]

4.2.3 Citlivost na počáteční podmínky

Ferorezonanční obvod vykazuje vysokou citlivost na počáteční podmínky. Počáteční podmínky rozhodují o nastávajícím stabilním stavu, normálním nebo ferorezonančním. Jak již bylo zmíněno v předchozím textu, mezi počáteční podmínky v obvodu patří remanentní magnetizace jádra cívky, napětí harmonického zdroje v okamžiku sepnutí a počáteční nabití kondenzátoru. I malé rozdíly v těchto počátečních podmínkách mohou způsobit vznik zcela odlišných stabilních stavů. Stabilní stavy jsou periodické nebo neperiodické. [6,10]



Ilustrace 13: Citlivost na počáteční podmínky [6]

Na ilustraci 13 jsou celkem tři křivky popisující závislost napětí kapacity U_C na magnetickém toku Φ . Počáteční podmínky v závislosti určující nastávající stabilní stav jsou S_{01} a S_{02} . Hranici mezi stabilními stavy tvoří křivka C , na které leží nestabilní stav S_{2a} . Nestabilního stavu S_{2a} je reálně téměř nemožné dosáhnout. Určité počáteční podmínky S_{01} dávají vzniknout normálnímu stabilnímu stavu S_{2n} . Za dalších počátečních podmínek S_{02} řešení konverguje ke stabilnímu ferorezonančnímu stavu S_{2f} . [6]

4.3 Zařazení druhů ferorezonance

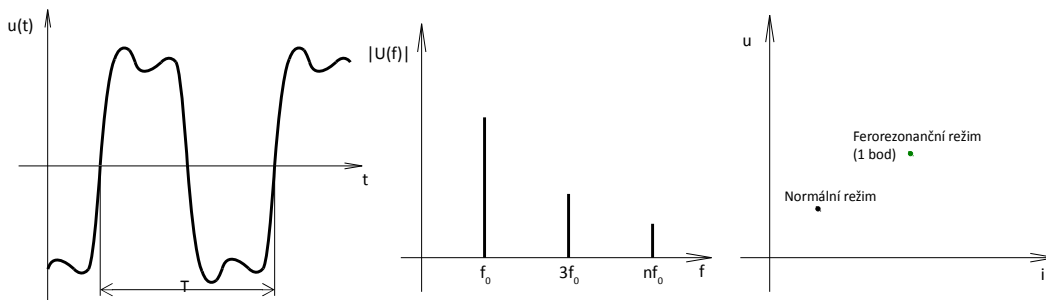
Typy ferorezonance jsou stanoveny pro ustálený stav systému, jelikož je obtížná rozlišitelnost normálního a ferorezonančního přechodového děje. Ferorezonanční přechodové děje mohou být stejně jako normální přechodové děje nebezpečné pro elektrická zařízení. Mohou se projevit přepětím po určitou dobu po přechodovém jevu. Zařazení typů ferorezonance vzniklo vzhledem ke zkušenostem s ději v napájecích systémech, k provedeným experimentům na modelech systémů a k numerickému řešení. Ferorezonance se dělí na čtyři typy. Tyto typy jsou specifické svým chováním a vlastnostmi. [6]

Typ ferorezonance může být určen:

- z frekvenčního spektra napěťových nebo proudových průběhů,
- pomocí stroboskopického obrazu²,
- chováním ve fázové rovině³. [6,12]

4.3.1 Fundamentální typ

Jedná se o základní typ ferorezonance, kdy jsou průběhy napětí i proudů neharmonické, periodicky se opakující. Perioda napětí a proudů je shodná s periodou napájecího zdroje. Spektrum napětí a proudů je složeno ze základní harmonické f_0 a harmonických složek vyšších řádů. Při fundamentálním typu ferorezonance stroboskopický obraz systému vykazuje jeden bod vzdálený od bodu normálního stavu. [6,12]

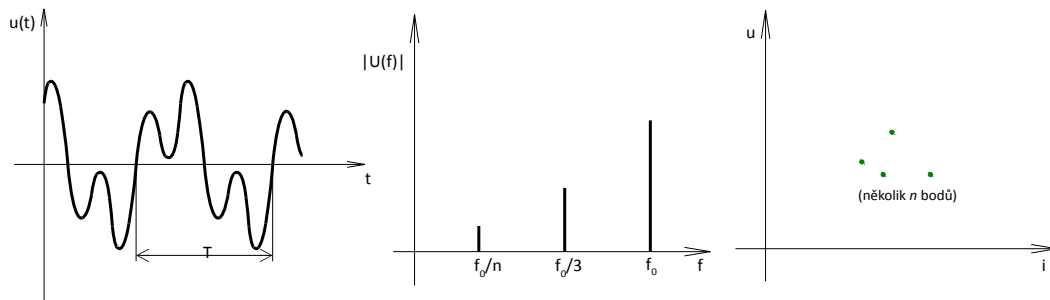


Ilustrace 14: Fundamentální typ [6]

4.3.2 Subharmonický typ

Napěťový a proudový průběh se periodicky opakují stejně jako u fundamentálního typu, ale perioda průběhu napětí a proudu je násobkem n periody zdroje T . Frekvenční spektrum subharmonického typu vychází ze vztahu f_0/n , kde f_0 je kmitočet zdroje a n je celé číslo. Vyšší harmonické složky jsou u subharmonického typu většinou lichého řádu. Ve stroboskopickém obrazu leží několik bodů. [6,12]

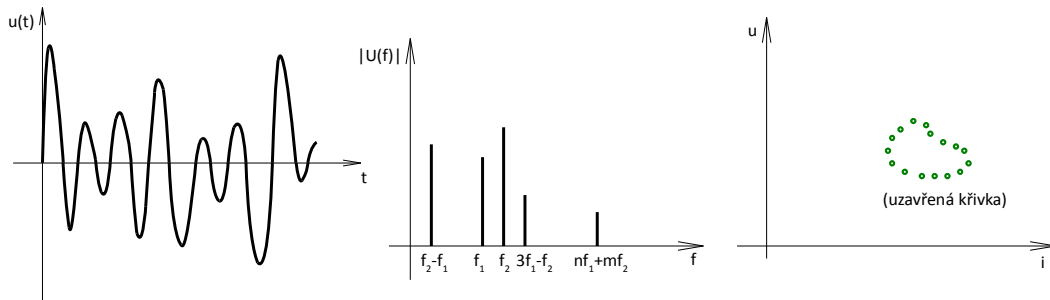
2 Stroboskopický obraz je zobrazení okamžitých hodnot napětí a proudů v rovině u, i v okamžicích oddělených od periody napájecího systému. Napětí a proud jsou pro tento obraz měřeny ve stejném bodě obvodu.
3 Fázová rovina je závislost derivace funkce na vzoru funkce, někdy je označována jako fázový portrét.



Ilustrace 15: Subharmonický typ [6]

4.3.3 Kvaziperiodický typ

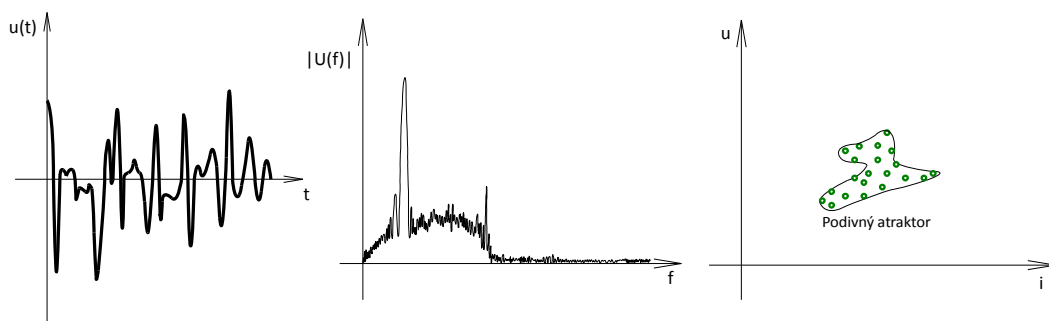
Kvaziperiodický typ ferorezonance se periodicky neopakuje. Frekvenční spektrum u tohoto typu je nespojité a vychází ze vztahu nf_1+mf_2 , kde n a m jsou celá čísla a f_1/f_2 jsou iracionální reálná čísla. Stroboskopický obraz tvoří skupina bodů představující uzavřenou křivku. Někdy je tento typ ferorezonance označován jako pseudoperiodický. [6,12]



Ilustrace 16: Kvaziperiodický typ [6]

4.3.4 Chaotický typ

Průběhy napětí a proudů u tohoto typu nejsou periodické a jejich frekvenční spektrum je spojité. Chaotický typ může obsahovat všechny kmitočty. Neperiodičnost a obsah libovolné frekvence vede k nepředvídatelnému chování v obvodu. Jako stroboskopický obraz se jeví tzv. podivný atraktor⁴. [6,12]



Ilustrace 17: Chaotický typ [6]

4 Podivný atraktor je obrazec, do kterého je dynamický systém přitahován v určitém čase t . Zavedl ho Edward Lorenz v roce 1963.

Jeden ze čtyř ferorezonančních typů může nastat po přechodu mezi dvěma velmi odlišnými ustálenými stavy systému změnou parametrů obvodu. [6]

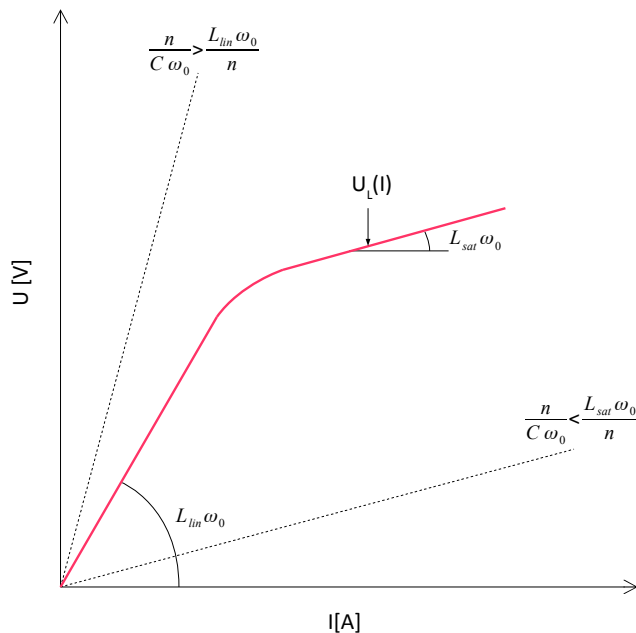
Ferorezonance představuje riziko pro elektrická zařízení vlivem výskytu vyšších harmonických složek napětí a proudů. Rovnovážný stav ferorezonance je v obvodu udržován napájecím systémem. [6]

4.4 Podmínka periodické ferorezonance

K řešení ferorezonančního obvodu je vhodné použít nějakou numerickou metodu. Avšak analyticky lze předpovědět vznik periodické ferorezonance (fundamentálního nebo subharmonického typu). Pro nelineární indukčnost určenou křivkou V-A charakteristiky nemůže v sériovém spojení s kapacitou C dojít k periodické ferorezonanci za následujících podmínek:

$$\frac{L_{lin} \omega_0}{n} < \frac{n}{C \omega_0} < \frac{L_{sat} \omega_0}{n} \quad [H, \text{rad.s}^{-1}; F, \text{rad.s}^{-1}; H, \text{rad.s}^{-1}], \quad (15)$$

kde n je řád harmonické složky (pro fundamentální typ je $n=1$). Křivka nelineární indukčnosti spolu s polopřímkami vytyčujícími hranice vzniku periodické ferorezonance je na ilustraci 18. [6,12]



Ilustrace 18: Hodnoty C , při kterých nedochází k periodické ferorezonanci [12]

4.5 Identifikace ferorezonance

V průběhu let zkoumání ferorezonance byly zjištěny jevy, které doprovázejí její vznik. Pomocí nich může být identifikována situace vedoucí k ferorezonanci. K takovýmto jevům patří:

- přepětí a nadproudy,
- trvalé zkreslení průběhů napětí a proudů,
- přehřívání zařízení (transformátoru) v chodu naprázdno,
- hlučnost zařízení,
- nesprávná funkčnost ochranných zařízení (předčasné vypínání),
- poškození elektrických zařízení tepelným účinkem,
- poškození izolace. [6,12]

K ferorezonanci může dojít také po určitých činnostech jako je:

- odpojení zátěže,
- odstraňování závad,
- nabuzení transformátoru,
- jednofázové přepínání,
- nebo ztráta systémového zemnění. [9]

Ferorezonance se často projevuje u transformátoru zničením primárního vinutí, zatímco sekundární vinutí zůstává bez poškození. [6]

V případě ferorezonančního stavu se zkreslené průběhy napěťových a proudových vln porovnávají se čtyřmi ferorezonančními typy. Také vyvstává potřeba ověřit, zda obvod splňuje nutné podmínky pro vznik ferorezonance:

- obvod musí obsahovat nelineární indukčnost a kapacitu,
- existence plovoucího bodu, jehož potenciál není pevný,
- malé ztráty v obvodu, tedy malé zatížení. [6]

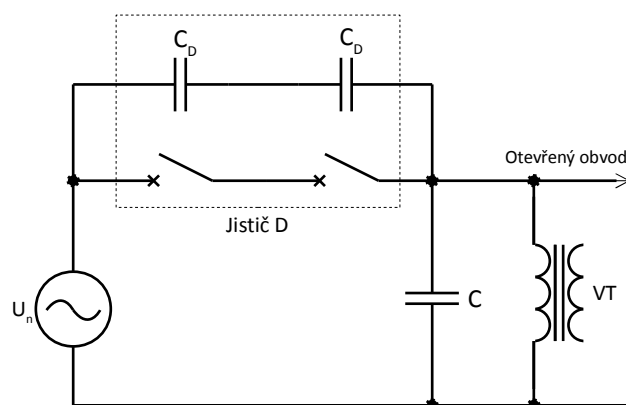
V závislosti na hodnotě kapacity může dojít k jednomu ze čtyř ferorezonančních stavů. Například subharmonický typ vzniká v obvodech s vyšší kapacitou (větší než 50000 pF). [9]

4.6 Příklady obvodů náchylných k ferorezonanci

Energetické distribuční systémy obsahují velké množství přesytitelných indukčností a kapacit, proto jsou nekonečné možnosti konfigurací obvodů náchylných k ferorezonanci. [6]

Vědecké práce zabývající se ferorezonanci poskytují přehled několika konfigurací obvodů se sklonem k tomuto jevu:

- transformátor náhodně napájený jednou nebo dvěma fázemi,
- transformátor buzený přes zhášecí kondenzátor přes jeden nebo více otevřených jističů,
- transformátor připojený do série s kompenzovaným vedením,
- napěťový transformátor připojený k systému s izolovaným neutrálním bodem,
- energetický systém uzemněný přes tlumivku,
- transformátor připojený k odbuzenému přenosovému vedení, které pracuje paralelně s jedním nebo více buzenými vedeními,
- transformátor napájený dlouhým přenosovým vedením nebo kabelem s nízkým zkratovým výkonem. [6,9]



Ilustrace 19: Ferorezonance napěťového transformátoru připojeného do série s otevřeným jističem. [6]

První z výčtu ferorezonančních obvodů je na ilustraci 19. Ferorezonanci v takovém obvodě může vyvolat vypnutí jističe. Kondenzátor s kapacitou C_d se vybije přes napěťový transformátor, který je tím uveden do saturace. Napěťový zdroj pak dodává dostatečnou

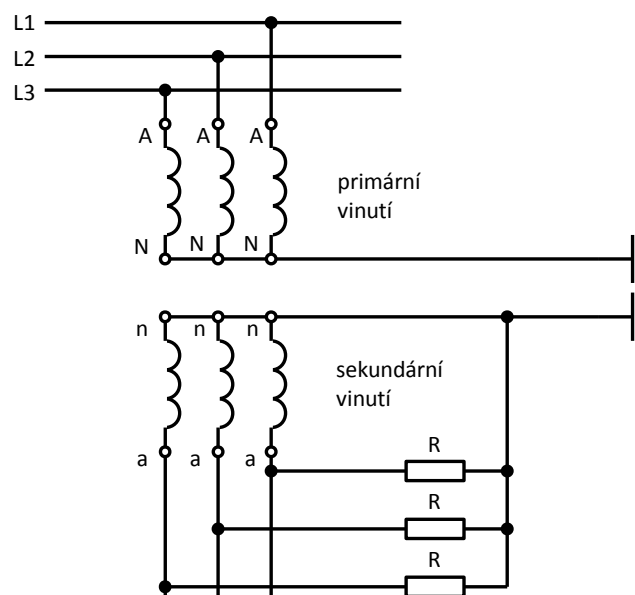
energii k udržení zkreslených kmitů. Kapacita vedení vůči zemi je nahrazena kapacitou C . Vzniklá ferorezonance je subharmonického typu. [6]

4.7 Předcházení vzniku ferorezonance

Předcházení vzniku ferorezonance vychází hlavně ze znalosti rizikových konfigurací obvodu. To souvisí se zavedením jisté rezervy v parametrech systému, tak aby se systém nedostal do rizikové oblasti. [6]

Také činnosti spojené s údržbou energetických distribučních systémů je nutno kontrolovat. Mělo by se předcházet určitým činnostem na vedení, zejména nesymetrickým spínacím operacím. [6]

Napěťový zdroj by v případě vzniku ferorezonance neměl tento jev udržovat. K tomu se používají například tlumicí odpory R připojené na sekundární vinutí transformátoru. Tak se zvýší odporová zátěž a obvod je vyveden z ferorezonance. Jelikož jsou rezistory v normálním režimu příliš tepelně namáhány, používá se jejich připínání na sekundární vinutí v případě detekce zkreslených kmitů proudu. Někdy se paralelně k rezistorům připojuje indukčnost, která eliminuje vznik ferorezonance subharmonického typu. [6,9]



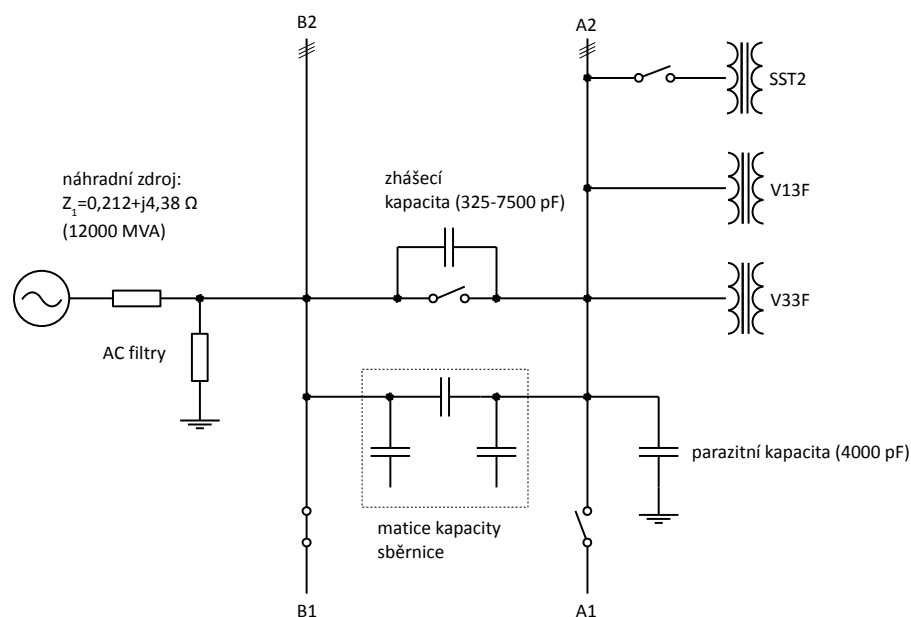
Ilustrace 20: Tlumicí rezistory připojené na sekundární vinutí transformátoru [6]

4.8 Příklad ničivého účinku ferorezonance

Jacobson D.A.N. ve své práci [9] uvádí případ selhání přístrojového transformátoru: „V kanadské provincii Manitoba leží Dorseyova HVDC měnírna. Tato měnírna má 230 kV sběrnici střídavého proudu rozdělenou do čtyř částí, které jsou ukončeny přenosovým vedením.

Dne 20. května 1995 ve 22:04 byla odpojena sběrnice A2 (ilustrace 21), aby mohly být vyměněny jističe, proudové transformátory a mohla být provedena údržba na vedení. Ve 22:30 toho samého dne došlo k selhání přístrojového transformátoru (V13F) a vznikla škoda na zařízení v okruhu 33 metrů.

Postup odpojení způsobil odbuzení sběrnice. Přístrojový transformátor byl v tu chvíli připojen na nabuzenou sběrnici B2 přes zhášecí kondenzátor s kapacitou 5061 pF otevřených jističů na 230 kV. Servisní transformátor SST2 normálně připojený ke sběrnici A2 byl předtím odpojen. Ke vzniku ferorezonance došlo kvůli selhání přístrojového transformátoru V13F.“



Ilustrace 21: Zjednodušené schéma selhání přístrojového transformátoru [9]

Ferorezonanci ve výše popsaném případě lze předejít použitím přístrojového transformátoru určeného pro mezifázové napětí, u něhož nedochází k přesycení feromagnetického jádra při poruše. [9]

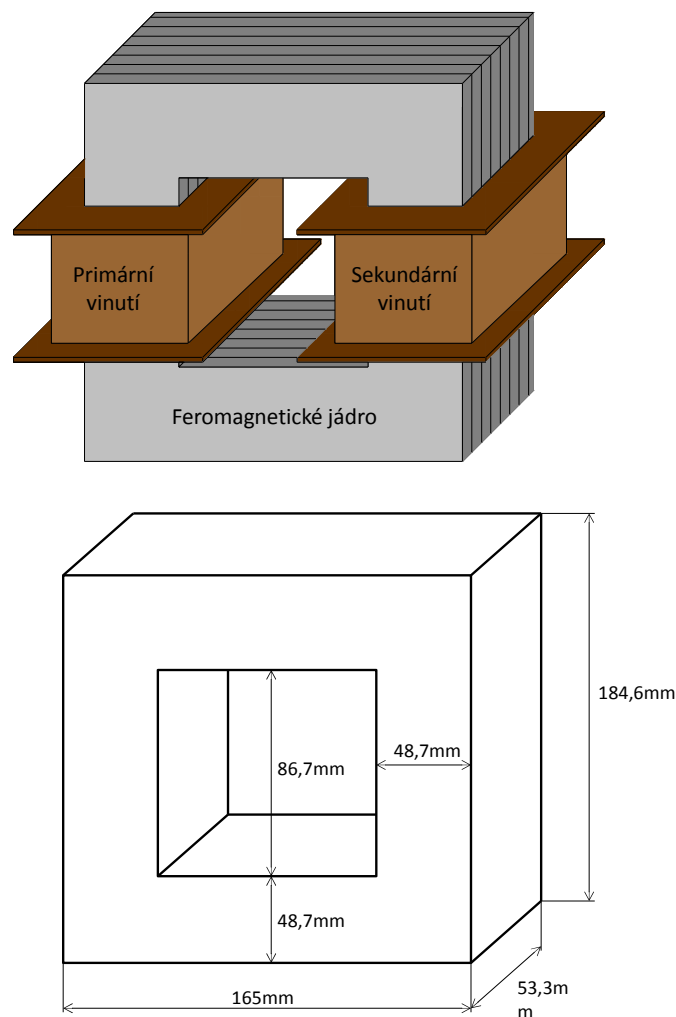
Po problému s přístrojovým transformátorem V13F byly nainstalovány tlumící rezistory o hodnotě 200 Ω na sekundární vinutí servisních transformátorů stanice SST. Přístrojové transformátory byly nahrazeny kapacitními napěťovými transformátory CVT. [9]

5 Měření na ferorezonančním obvodu

Tuto část práce tvoří analýza obvodu, který je tvořen:

- nelineární indukčností L (tlumivkou),
- malými Joulovými ztrátami (podílí se na nich pouze odpor vinutí tlumivky R_{vin}),
- kondenzátorovou baterií C zapojenou sériově s nelineární indukčností,
- a zdrojem napětí (autotransfornátorem).

Jako náhradu tlumivky je možné použít jednofázový jádrový transformátor se zapojeným primárním vinutím a rozpojeným sekundárním vinutím. Použitý transformátor s uvedenými rozměry je na ilustraci 22. Na tomto transformátoru je v této práci naměřena V-A charakteristika nelineární indukčnosti L .

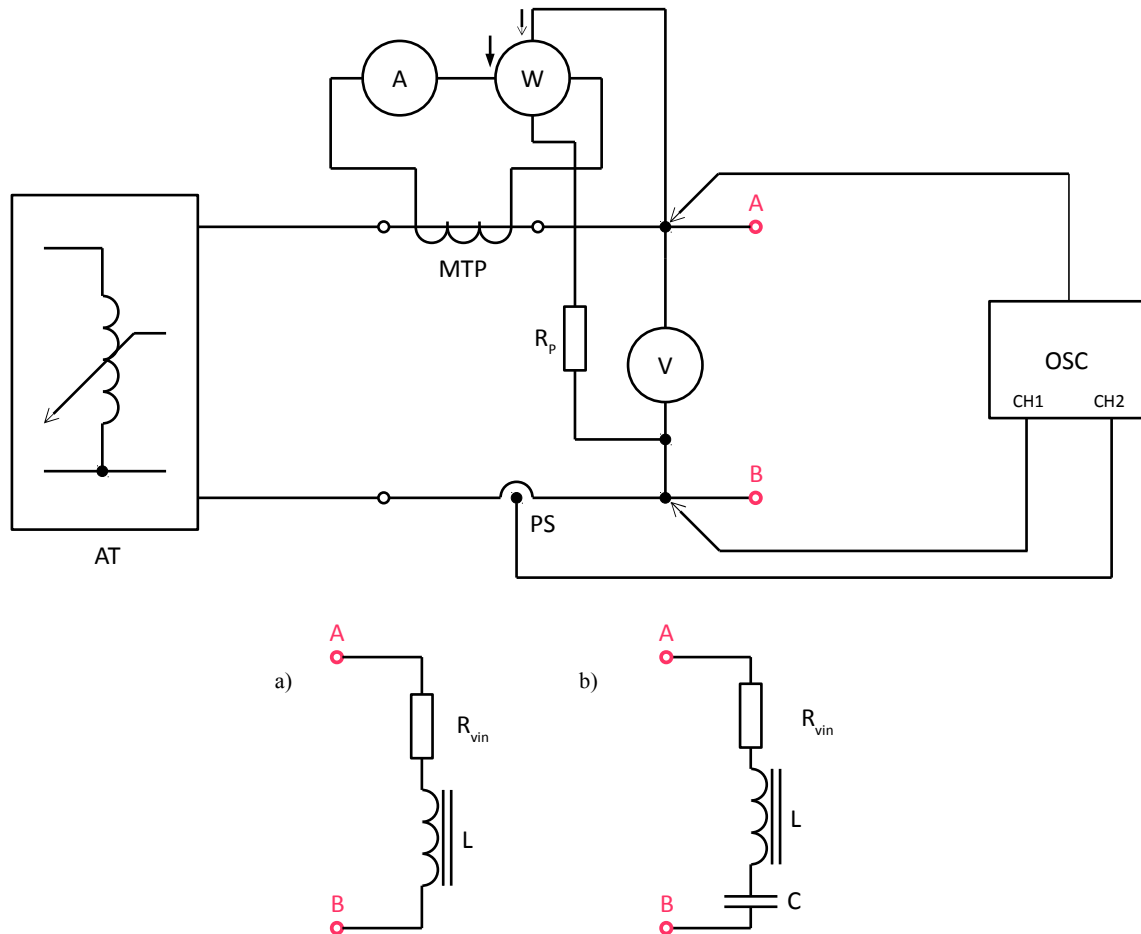


Ilustrace 22: Jednofázový jádrový transformátor s jeho rozměry

5.1 Měřicí obvod

Měřicí obvod je napájen autotransfornátorem, tedy regulovatelným zdrojem napětí. Součástí obvodu jsou analogové měřicí přístroje (ampérmetr, voltmetr, wattmetr). Do obvodu jsou zapojeny dva typy zátěží:

- samotná tlumivka,
- sériové spojení kondenzátorové baterie s tlumivkou.



AT – autotransfornátor, **MTP** – měřicí transformátor proudu, **OSC** – osciloskop, **R_p** – předřadný odpor, **PS** – proudová sonda

Ilustrace 23: Schéma zapojení měřicího obvodu: a) samotná tlumivka, b) sériové spojení tlumivky a kondenzátorové baterie

Autotransfornátorem je regulováno napětí sestupně od přibližně 240 V na nejnižší možnou hodnotu napětí, při které je ještě možné odečítat z přístrojů, ampérmetru a wattmetru. Frekvence zdroje f je 50 Hz. Měření probíhá na dvou variantách zapojení:

- samotná tlumivka,
- sériové spojení tlumivky a kondenzátorové baterie.

Ampérmetr měří proud přes převod realizovaný měřicím transformátorem proudu. Napěťový rozsah wattmetru je připojen přes předřadný odpor R_p . Ampérmetr, voltmetr, wattmetr jsou analogové přístroje a měří efektivní hodnoty. Tyto přístroje mají v obvodu pouze informativní význam. Pro pozdější výpočet slouží hodnoty z osciloskopu. Na osciloskopu jsou použity dva kanály, kanál *CH1* je připojen přes napěťovou sondu na měřený obvod, na kanál *CH2* je připojena proudová klešťová sonda.

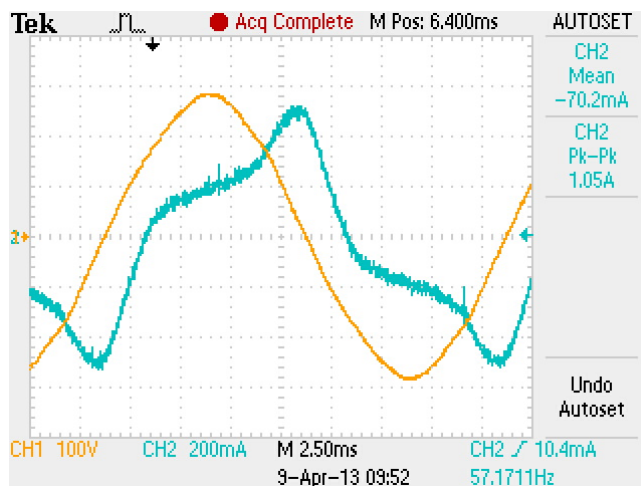
5.2 Naměřené hodnoty

Hodnoty naměřené analogovými přístroji je nutné kvůli chybám prokládat polynomem n -tého stupně, proto jsou pro výpočet použity hodnoty naměřené osciloskopem.

Použitý osciloskop je *Tektronix TDS 2024B*. Jedná se o čtyřkanálový osciloskop s digitálním úložným prostorem s možností ukládání naměřených hodnot do externí paměti (flash disku) připojené přes *USB* port. Při měření je využita právě tato možnost.

V průběhu měření ukládá osciloskop do externí paměti:

- dva textové soubory ve formátu *.csv*,
- jeden grafický soubor ve formátu *.jpg*
- a soubor s nastavením.



Ilustrace 24: Průběhy napětí a proudu uložené osciloskopem

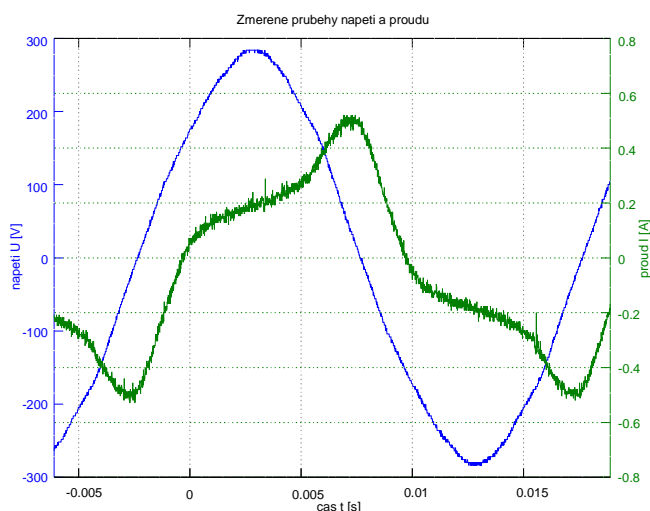
Každému kanálu osciloskopu náleží jeden textový soubor, kanálu *CH1* soubor s napětím a kanálu *CH2* soubor s proudem. Textové soubory z osciloskopu formátu *.csv* je možno zobrazit v tabulkovém editoru *Calc*⁵, kde jsou podstatné dva sloupce s hodnotami. V jednom sloupci

⁵ *Calc* je tabulkový editor kancelářského softwaru *LibreOffice*.

jsou vzorky časů v určitém intervalu a ve druhém sloupci jsou hodnoty napětí (proudů) odpovídající časovým vzorkům.

Z těchto textových souborů jako výstupů z osciloskopu je potřeba získat amplitudové spektrum časových průběhů napětí a proudu. Možným způsobem amplitudové analýzy je program *Tektronix* napsaný v jazyce *GNU Octave*, který převádí průběhy napětí a proudu z časové do amplitudové oblasti pomocí algoritmu *Rychlé Fourierovy transformace*⁶ (FFT). Program *Tektronix* ukládá výsledky do několika souborů:

- grafický soubor *.png* s překreslenými průběhy napětí a proudu (zobrazuje to samé, co obrazový soubor přímo z osciloskopu),
- dva grafické soubory *.png* s frekvenčními spektry měřeného napětí a proudu,
- dva textové soubory *.txt* s numerickými hodnotami amplitud jednotlivých frekvenčních složek v průběhu napětí a proudu (program *Tektronix* vybírá až tisíce řád vyšší harmonické složky včetně stejnosměrné složky).



Ilustrace 25: Průběhy napětí a proudu vytvořené programem *Tektronix*

Ke zpracování v podobě numerického a grafického řešení jsou vybrány ze dvou textových souborů programu *Tektronix* jen harmonické složky, jejichž amplitudy se podstatně podílí na výsledném průběhu napětí a proudu. Tyto harmonické složky a jejich amplitudy jsou zapsány do textového souboru *.csv*, který je možné otevřít v programu *Calc*. Textový soubor s harmonickými složkami a jejich amplitudami vypadá následovně (ve formě tabulky):

⁶ *Rychlá Fourierova transformace* (FFT) je účinný algoritmus výpočtu *Fourierovy transformace*, při kterém je redukován počet komplexních součinů z N^2 na $N \cdot \log_2 N$. *Fourierova transformace* převádí signál z časové oblasti $x(t)$ do frekvenční oblasti $X(f)$.

Pořadí	U [V]			I [A]			
	1. harmonická	3. harmonická	5. harmonická	stejnosem- měrná složka	1. harmonická	3. harmonická	5. harmonická
1	327.99	12.01	2.59	0.0109	0.6446	0.2516	0.0627
2	316.05	10.48	3.18	0.0082	0.5611	0.2129	0.0538
3	303.37	9.26	3.45	0.0119	0.4935	0.1821	0.0476
4	287.67	6.06	2.39	0.0058	0.4254	0.1501	0.0417
5	275.47	6.47	3.71	0.0019	0.3772	0.1281	0.0382
6	260.91	5.33	3.52	0.0062	0.3284	0.1052	0.0338
7	247.49	4.86	3.17	0.0049	0.2902	0.0854	0.0289
8	234.39	4.03	3.53	0.0063	0.2575	0.0701	0.0245
9	221.44	3.27	3.49	0.0044	0.2329	0.0567	0.0186
10	208.73	3.01	3.41	0.0064	0.2111	0.0481	0.0149

Tabulka 1: Jednotlivé harmonické složky a jejich amplitudy (Tato tabulka obsahuje polovinu vybraných hodnot v zapojení se samotnou tlumivkou.)

Tabulky s amplitudami napětí a proudu jsou v příloze (**Příloha C** a **Příloha D**).

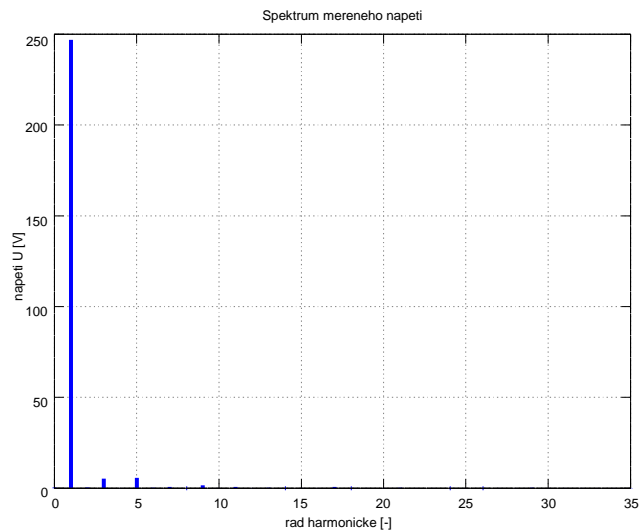
5.3 Postup výpočtu modelu sériového ferorezonančního obvodu

Výpočet je zaměřen na jednoduché namodelování sériového ferorezonančního obvodu. Pro každou napěťovou hladinu (každý řádek v tabulce) jsou počítány všechny kroky výpočtu. K dispozici jsou naměřené hodnoty v obvodu se samotnou tlumivkou, kapacita kondenzátorové baterie a změřený odpor vinutí tlumivky. Ve výpočtu jsou dva stěžejní výsledky:

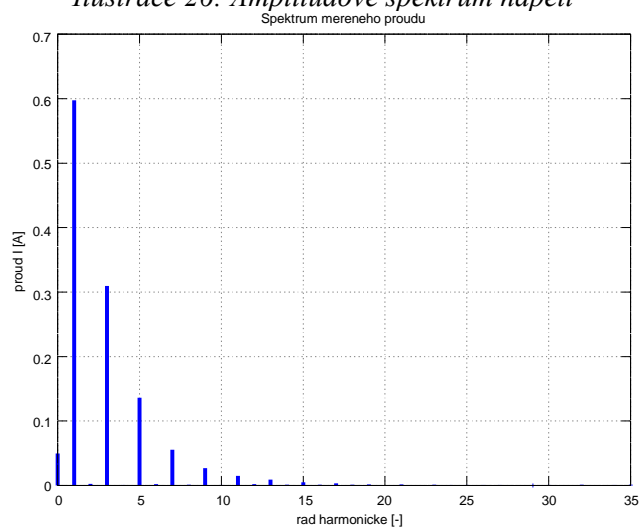
- indukční reaktance tlumivky X_L , případně její vlastní indukčnost L ,
- a celkové napětí na měřeném obvodu U_I .

5.3.1 Efektivní hodnota napětí a proudu

Vstupními veličinami jsou amplitudy napětí a proudu s jejich vyššími harmonickými složkami, v případě proudu pak i se stejnosměrnou složkou. Stejnosem-
měrná složka v průběhu napětí je zanedbána, v průběhu proudu je však důležitá (viz ilustrace 26 a 27).



Ilustrace 26: Amplitudové spektrum napětí



Ilustrace 27: Amplitudové spektrum proudu

Efektivní hodnota celkového napětí je vyjádřena vztahem:

$$U = \sqrt{\left(\frac{U_{m(1)}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{m(3)}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{m(5)}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_{m(n)}}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad [\text{V}], \quad (16)$$

kde $U_{m(1)}$, $U_{m(3)}$, $U_{m(5)} \dots U_{m(n)}$ jsou maximální hodnoty napětí jednotlivých harmonických složek.

Z neharmonického průběhu proudu je zvlášť stanovena efektivní hodnota základní vlny

$$I_z = \frac{I_{m(1)}}{\sqrt{2}} \quad [\text{A}], \quad (17)$$

kde $I_{m(1)}$ je maximální hodnota základní vlny proudu, a součet efektivních hodnot vyšších harmonických složek

$$I_h = \sqrt{\left(\frac{I_{m(3)}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{m(5)}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{m(n)}}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad [\text{A}], \quad (18)$$

kde $I_{m(3)}, I_{m(5)} \dots I_{m(n)}$ jsou maximální hodnoty vyšších harmonických složek proudu. V celkové efektivní hodnotě proudu je započítána také stejnosměrná složka I_s :

$$I = \sqrt{I_s^2 + I_z^2 + I_h^2} \quad [\text{A}]. \quad (19)$$

Složky proudu I_s, I_z, I_h a I jsou použity k výpočtu výkonů měřeného obvodu. [4]

5.3.2 Výkon

Měřený obvod odebírá činný výkon úměrný druhé mocnině proudu I procházející odporem vinutí R_{vin} :

$$P = R_{vin} \cdot I^2 \quad [\text{W}; \Omega, \text{A}^2]. \quad (20)$$

Vztah pro zdánlivý výkon základní vlny

$$S_1 = U \cdot I_z \quad [\text{VA}; \text{V}, \text{A}] \quad (21)$$

vede k vyjádření jalového výkonu základní vlny

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P^2} \quad [\text{VAr}; \text{VA}, \text{W}]. \quad (22)$$

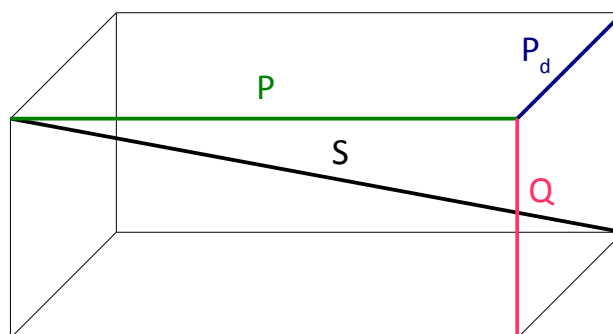
Protože se jedná o nelineární obvod, je nutno počítat s *deformačním výkonem* P_d . Výkon P_d je generován vyššími harmonickými složkami a stejnosměrnou složkou proudu:

$$P_d = U \sqrt{I_s^2 + I_h^2} \quad [\text{VAd}; \text{V}, \text{A}]. \quad (23)$$

Celkový jalový výkon zahrnuje jalový výkon základní vlny Q_1 a deformační výkon P_d :

$$Q = \sqrt{Q_1^2 + P_d^2} \quad [\text{VAr}; \text{VAr}, \text{VAd}]. \quad (24)$$

Vztahy mezi výkony lze pochopit geometrickým uspořádáním v kvádru o hranách P, Q a P_d , kde tělesovou úhlopříčkou je zdánlivý výkon (viz ilustrace 28). [4]



Ilustrace 28: Geometrické uspořádání výkonů

5.3.3 Vlastní indukčnost tlumivky

Prvním důležitým výsledkem výpočtu je vlastní indukčnost tlumivky L . Její statická charakteristika udává úroveň nasycení feromagnetického jádra.

Ze vztahu pro jalový výkon

$$Q = X_L \cdot I^2 \quad [\text{VAr}; \Omega, \text{A}^2] \quad (25)$$

je vyjádřena induktivní reaktance

$$X_L = \frac{Q}{I^2} \quad [\Omega; \text{VAr}, \text{A}^2]. \quad (26)$$

Při známé frekvenci harmonického zdroje f je možné dopočítat vlastní indukčnost tlumivky

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad [\text{H}; \Omega, \text{Hz}]. \quad (27)$$

5.3.4 Celkové napětí

Druhým důležitým výsledkem výpočtu je celkové napětí na měřeném obvodu U_1 , jehož pomocí se určí chování namodelovaného ferorezonančního obvodu.

Napětí na odporu vinutí U_R je úměrné protékajícímu proudu:

$$U_R = R_{\text{vin}} \cdot I \quad [\text{V}; \Omega; \text{A}]. \quad (28)$$

Modelovaný obvod obsahuje induktivní i kapacitní reaktanci. Také napětí na induktivní reaktanci U_L a kapacitní reaktanci U_C jsou úměrná protékajícímu proudu:

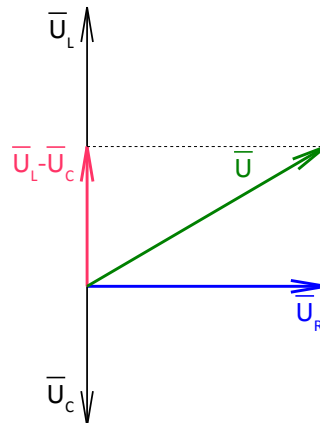
$$U_L = X_L \cdot I \quad [\text{V}; \Omega; \text{A}], \quad (29)$$

$$U_C = X_C \cdot I \quad [\text{V}; \Omega; \text{A}]. \quad (30)$$

Součet napětí na odporu vinutí a rozdílu reaktančních napětí je roven celkovému napětí na měřeném obvodu

$$U_1 = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad [\text{V}]. \quad (31)$$

Druhá mocnina rozdílu reaktančních napětí vytváří kladnou hodnotu. Celkové napětí lze chápat jako vektorový součet (viz ilustrace 29).



Ilustrace 29: Vektorový součet napětí

5.4 Numerické řešení modelu sériového ferorezonančního obvodu

Numerické řešení je realizováno softwarově pomocí vysokoúrovňového interaktivního jazyka pro numerické výpočty *GNU Octave 3.6.4*. (<http://www.gnu.org/software/octave/index.html>). V tomto jazyce je vytvořen program k namodelování sériového ferorezonančního obvodu. Skript programu je napsán v editoru zdrojových kódů *Notepad++* (<http://notepad-plus-plus.org/>) a řídí se podle výpočtu modelu sériového ferorezonančního obvodu. Jednotlivé části skriptu jsou popsány v následujících podkapitolách.

5.4.1 Efektivní hodnota napětí a proudu

Příkaz *csvread* načítá data z textového souboru *.csv* (viz tabulka 1) a ukládá je do vstupní matice **T**. Nakopírováním příslušných prvků matice **T** jsou vytvořeny dvě matice, **U** a **I**. Matice **U** obsahuje amplitudy napětí a matice **I** amplitudy proudu. Vektor **is** nabývá prvků stejnosměrných složek proudu vybraných ze vstupní matice **T**. Vstupní konstanty, které používají v programu vztahy pro výpočet, jsou následující:

- *efkonst* pro přepočet maximálních hodnot na efektivní hodnoty,
- frekvence harmonického zdroje f ,
- odpor vinutí tlumivky r ,
- kapacita kondenzátorové baterie c
- a kapacitní reaktance x_c .

Prvky matic **U** a **I** převádí na efektivní hodnoty součin maximálních hodnot s konstantou *efkonst*. Popisovaná část skriptu je uvedena:

```

%NACTENI
T=csvread('lol.csv');
%MAXIMALNI HODNOTY
U=T(3:22,2:4);
I=T(3:22,6:8);
%ss slozka proudu
is=T(3:22,5);
%VSTUPNI KONSTANTY
efkonst=1/sqrt(2);
f=50;
r=0.863;
c=0.000005;
xc=1/(2*pi*f*c);
%EFEKTIVNI HODNOTY
Ue=efkonst*U;
Ie=efkonst*I;

```

První sloupec matic **Ue** a **Ie** naplněný efektivními hodnotami základní vlny do sebe kopírují vektory **uz** a **iz**. Pro pozdější vztahy výkonů vyvstává potřeba sčítat zvlášť vyšší harmonické složky od základní vlny. K tomu program používá cykly *for*. Vnější cyklus postupuje po řádcích, vnitřní cyklus krokuje od druhého k poslednímu sloupci matic **Ue** a **Ie**. Pomocné proměnné *pom* a *pom1* umožňují přičítání následujících druhých mocnin vyšších harmonických složek, tak aby pak bylo možné jejich součet odmocnit a tím získat celkový součet vyšších harmonických složek **uh** a **ih**. Na konci vnějšího cyklu *for* dochází ke sčítání efektivních hodnot napětí základní vlny **uz** a vyšších harmonických složek **uh**. U proudu se k efektivním hodnotám základní vlny **iz** a vyšších harmonických složek **ih** přičítá navíc stejnosměrná složka proudu **is**. Tak jsou vypočítány celkové efektivní hodnoty napětí **u** a proudu **i**. Část popisovaného skriptu je uvedena:

```

%zakladni vlna
uz=Ue(:,1);
iz=Ie(:,1);
%vyssi harmonicke
for a=1:size(Ue,1)
    pom=0;
    pom1=0;
    for b=2:size(Ue,2)
        pom=Ue(a,b)^2+pom;
        pom1=Ie(a,b)^2+pom1;
    end
    uh(a)=sqrt(pom);
    ih(a)=sqrt(pom1);
%celkove efektivni hodnoty
u(a)=sqrt(uz(a)^2+uh(a)^2);
i(a)=sqrt(is(a)^2+iz(a)^2+ih(a)^2);
end

```

5.4.2 Výkon

Tato část programu generuje několik vektorů obsahujících výkony v měřeném obvodu. Od vektoru činného výkonu \mathbf{p} po vektor jalového výkonu \mathbf{q} se výpočet řídí podle již uvedených vztahů (podkapitola 5.3.2). Cyklus *for* zde opakuje výpočet pro všechny prvky vektoru napětí \mathbf{u} a vektorů proudů \mathbf{i} , \mathbf{is} , \mathbf{iz} , \mathbf{ih} . Kvůli zjednodušení se v tomtéž cyklu *for* dopočítává vektor indukční reaktance \mathbf{x}_l a vektor vlastní indukčnosti \mathbf{l} . Skript této části programu je uveden:

```
for d=1:length(u)
    p(d)=r*i(d)^2;
    s1(d)=u(d)*iz(d);%zdanlivy vykon zakladni vlny
    q1(d)=sqrt(s1(d)^2-p(d)^2);%jalovy vykon zakladni vlny
    pd(d)=u(d)*sqrt(is(d)^2+ih(d)^2);%deformacni vykon
    s(d)=sqrt(p(d)^2+q1(d)^2+pd(d)^2);%celkovy zdanlivy vykon
    q(d)=sqrt(q1(d)^2+pd(d)^2);%jalovy vykon
    xl(d)=q(d)/i(d)^2;
    l(d)=xl(d)/(2*pi*f);
end
```

Vektory výkonů nakonec program uloží do formátovaného textového souboru *.txt*, který se v externím programu (*Notepad++* nebo *Calc*) zobrazí ve formě tabulky.

5.4.3 Celkové napětí

Jako předchozí část skriptu programu se i tato část řídí podle již zmíněných vztahů pro výpočet napětí (podkapitola 5.3.4) v modelovaném sériovém ferorezonančním obvodu. V cyklu *for* s počtem opakování rovnajícím se počtu prvků vektoru napětí \mathbf{u} jsou vypočítány vektory:

- vektor napětí na odporu \mathbf{u}_r ,
- vektor napětí na kapacitě kondenzátorové baterie \mathbf{u}_c ,
- vektor napětí na indukčnosti tlumivky \mathbf{u}_l ,
- vektor celkového napětí \mathbf{u}_1 .

Popisovaná část skriptu programu je uvedena:

```
%NAPETI
for h=1:length(u)
    ur(h)=r*i(h);
    uc(h)=xc*i(h);
    ul(h)=xl(h)*i(h);
    ul(h)=sqrt(ur(h)^2+(ul(h)-uc(h))^2);
end
```

Kompletní skript programu numerického řešení modelu sériového ferorezonančního obvodu je ke zhlédnutí v příloze (**Příloha A**).

5.5 Postup výpočtu a numerické řešení sériového ferorezonančního obvodu

Jedná se o výpočet v obvodu, ve kterém je již připojena do série s tlumivkou kondenzátorová baterie. K dispozici jsou tedy naměřené hodnoty napětí a proudů tohoto obvodu. Výpočet je proveden pro každou napěťovou úroveň a jeho postup se téměř shoduje s výpočtem modelu sériového ferorezonančního obvodu. Vystupují zde dva hlavní výsledky:

- reaktance měřeného obvodu X
- a celkové napětí na měřeném obvodu U_I .

Postup výpočtu stejně jako numerické řešení nejsou dále detailněji rozebírány, jsou pouze uvedeny odlišnosti od výpočtu modelu sériového ferorezonančního obvodu.

5.5.1 Reaktance a celkové napětí sériového ferorezonančního obvodu

Na rozdíl od měřeného obvodu se samotnou tlumivkou, kde je v ideálním případě přítomna pouze induktivní reaktance, se v sériovém spojení tlumivky a kondenzátorové baterie objevuje rozdíl induktivní a kapacitní reaktance.

Ze vztahu pro jalový výkon se vyjádří reaktance měřeného obvodu

$$X = \frac{Q}{I^2} \quad [\Omega; \text{VAr}, \text{A}^2]. \quad (32)$$

Napětí na reaktanci již v sobě skrývá rozdíl napětí na reaktancích indukčnosti a kapacity, proto se pro toto napětí použije vztah:

$$U_X = X \cdot I \quad [\text{V}; \Omega, \text{A}] \quad (33)$$

5.5.2 Numerické řešení sériového ferorezonančního obvodu

Proud tekoucí sériovým ferorezonančním obvodem má více uplatňujících se vyšších harmonických složek než proud procházející obvodem se samotnou tlumivkou. To samé platí i pro napětí na sériovém ferorezonančním obvodu. Tato změna se projeví v tabulce amplitud napětí a proudů s jejich vyššími harmonickými složkami (textový soubor *.csv*), v případě proudu ještě se stejnosměrnou složkou, a to tak, že se zvětší počet sloupců. Sloupců proudu je více než sloupců napětí.

Část programu pro výpočet efektivních hodnot využívá tři cykly *for*. Vnější cyklus postupuje po řádcích matic **Ue** a **Ie**. Dva vnitřní cykly fungují každý zvlášť, první pro sloupce matice **Ue** a druhý pro sloupce matice **Ie**, kdy krokují od druhého k poslednímu sloupci. Ostatní úkony této části programu jsou podrobně popsány v předchozím textu (podkapitole 5.4.1). Pro ukázkou je zobrazena část popisovaného skriptu:

```
%vyssi harmonicke
for a=1:size(Ue,1)
    pom=0;
    for b=2:size(Ue,2)
        pom=Ue(a,b)^2+pom;
    end
    uh(a)=sqrt(pom);
    pom=0;
    for d=2:size(Ie,2)
        pom=Ie(a,d)^2+pom;
    end
    ih(a)=sqrt(pom);
%celkove efektivni hodnoty
    u(a)=sqrt(uz(a)^2+uh(a)^2);
    i(a)=sqrt(is(a)^2+iz(a)^2+ih(a)^2);
end
```

Výkony program řeší dle stejných výpočtových vztahů v cyklu *for* jako u modelu sériového ferorezonančního obvodu. V tomtéž cyklu je počítán vektor reaktance obvodu **x**, jehož každý prvek je zmenšený o konstantu 369,12. Tato konstanta vyrovnává rozdíl mezi kapacitami sériového ferorezonančního obvodu od jeho modelu. Řádek ve skriptu programu s výrazem pro reaktanci je zobrazen:

$$x(g) = (q(g) / i(g)^2) - 369.12;$$

Pak vektor napětí na reaktanci **ux** měřeného obvodu se nepočítá jako rozdíl dvou napětí reaktancí, induktivní a kapacitní, ale přímo jako proud procházející reaktancí obvodu:

$$ux(k) = x(k) * i(k);$$

Kompletní skript programu numerického řešení sériového ferorezonančního obvodu je ke zhlédnutí v příloze (**Příloha B**).

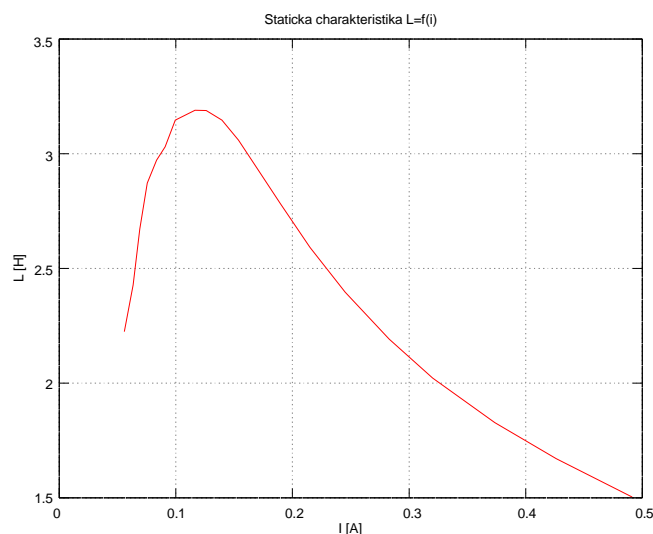
5.6 Grafický výstup numerického řešení

Programovací jazyk *GNU Octave* umí vykreslovat pomocí vestavěných funkcí grafické závislosti. Základní příkaz *plot* zobrazí funkční hodnoty vzhledem k nezávislým hodnotám v grafu. Do grafického okna lze editovat název grafu, popisky os, legendu, atd. Pro příklad je uvedena část skriptu realizující grafický výstup závislosti napětí na proudu modelovaného sériového ferorezonančního obvodu:

```
%GRAF NAPETI
figure(11)
plot(i,ul,'g',i,uc,i,ul,'r');
    title('V-A charakteristika namodelovaneho serioveho
ferorezonancniho RLC');
    xlabel('I [A]');
    ylabel('U [V]');
    legend('celkove napeti','napeti na kondenzatoru','napeti na
indukcnosti');
```

5.6.1 Závislost indukčnosti tlumivky na jejím budícím proudu

Prvním grafem je závislost indukčnosti tlumivky L na jejím budícím proudu I . Do určitého proudu se indukčnost zvyšuje. Po dosažení tohoto proudu dochází k nasycení feromagnetického jádra tlumivky. Proud nadále stoupá, ale závislost monotónně klesá. Popisovaný jev nasycení je na ilustraci 30.



Ilustrace 30: Statická charakteristika indukčnosti

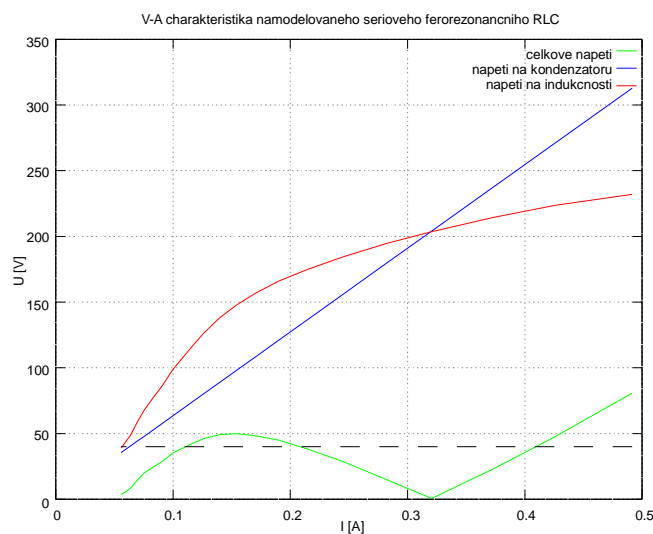
5.6.2 Voltampérová charakteristika modelu sériového ferorezonančního obvodu

Na ilustraci 31 jsou tři V-A charakteristiky. Červená křivka náleží charakteristice indukčnosti s feromagnetickým jádrem. Lze pozorovat pozvolné sycení magnetického obvodu tlumivky, kdy závislost přechází s rostoucím proudem z lineární do saturační části (podrobný popis této charakteristiky v podkapitole 4.2.1). Modrá polopřímka znázorňuje ideální V-A charakteristiku kapacity. V-A charakteristiky nelineární indukčnosti a kapacity jsou sečteny a vzniká závislost celkového napětí U_I na proudu, na ilustraci vykreslena světle zelenou křivkou.

Závislost výsledného celkového napětí U_I na proudu věrně kopíruje teoretickou V-A charakteristiku a vykazuje dvě oblasti chování obvodu:

- induktivní oblast, dokud napětí na nelineární indukčnosti U_L převyšuje napětí na kapacitě,
- a kapacitní oblast, kdy napětí na kapacitě U_C nabývá větších hodnot než napětí na nelineární indukčnosti.

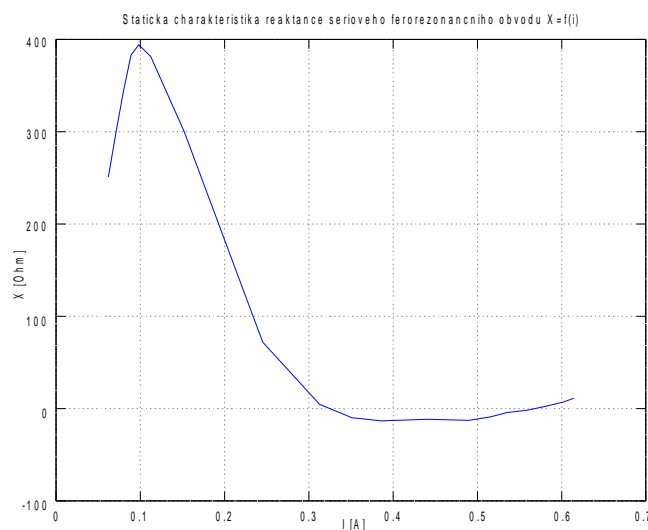
V bodě koincidence V-A charakteristik nelineární indukčnosti a kapacity je celkové napětí nulové. Naznačená napěťová úroveň černou čárkovanou přímkou protíná celkové napětí ve třech bodech. V prvním protnutí leží stabilní stav, kdy nedochází k ferorezonanci. Ve druhém protnutí je obvod v nestabilním stavu a ve třetím protnutí dochází k ferorezonanci. Na ilustraci 31 je vidět, že je splněna podmínka periodické ferorezonance (podkapitola 4.4).



Ilustrace 31: V-A charakteristika modelu sériového ferorezonančního obvodu

5.6.3 Závislost reaktance sériového ferorezonančního obvodu na proudu

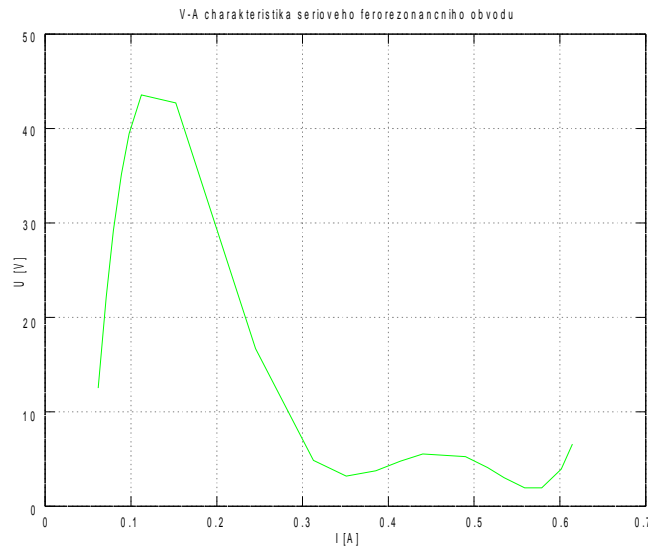
Výsledná závislost reaktance měřeného sériového ferorezonančního obvodu na proudu vyobrazená na ilustraci 32 by měla mít stejný tvar jako statická charakteristika indukčnosti (ilustrace 30). Závislost induktivní reaktance na budícím proudu by měla poklesnout o konstantní reaktanci kapacity a tak dá vzniknout výsledné statické charakteristice reaktance obvodu. Po výpočtu této závislosti se pro měřený obvod však zobrazuje její tvar, který se úplně neshoduje s teoretickým tvarem. Zejména v oblasti po dosažení maximální reaktance, kde by měla závislost už jen klesat, dochází za bodem minimální reaktance k opětovnému růstu.



Ilustrace 32: Statická charakteristika reaktance sériového ferorezonančního obvodu

5.6.4 Voltampérová charakteristika sériového ferorezonančního obvodu

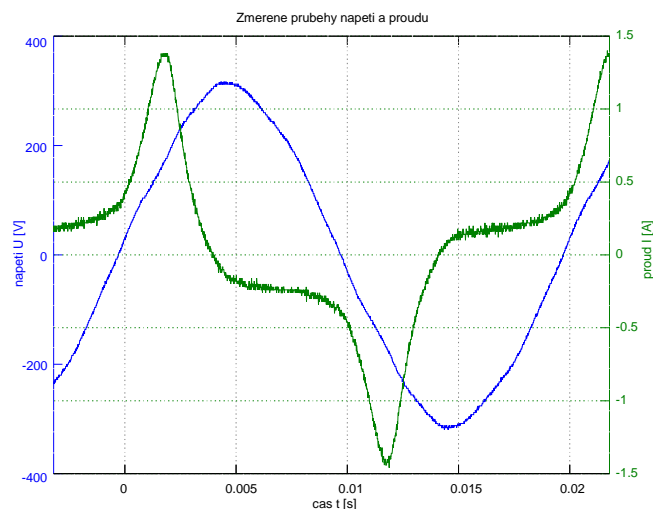
Tato charakteristika by se měla shodovat se závislostí celkového napětí na proudu modelu sériového ferorezonančního obvodu. Ilustrace 33 vykresluje chování měřeného obvodu. Měřený obvod se do určitého proudu, kdy je napětí prakticky nulové, téměř shoduje s modelem. Do tohoto proudu obvod vykazuje induktivní charakter. Pokud se proud dále zvyšuje měl by obvod nabývat kapacitní charakter. Ovšem kvůli statické závislosti reaktance na proudu (ilustrace 32), která od určitého bodu vzrůstá, se objevuje jakýsi zákmit. Možná se stále rostoucím proudem by měl obvod kapacitní charakter.



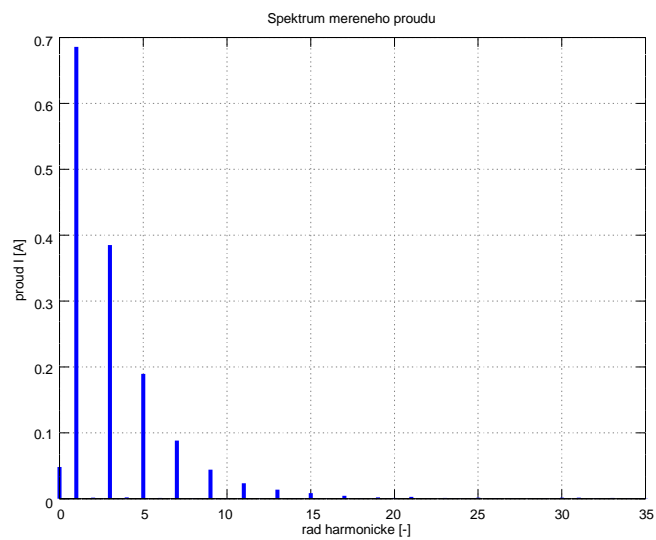
Ilustrace 33: V-A charakteristika sériového ferorezonančního obvodu

5.7 Příklad ferorezonančního stabilního stavu

V sériovém ferorezonančním obvodu může docházet v ustáleném stavu ke zkreslení průběhu protékajícího proudu. Na ilustraci 34 k takovému zkreslení dochází. Průběh proudu podle jeho amplitudového spektra na ilustraci 35 je zdeformován vznikající stejnosměrnou složkou spolu s vyššími harmonickými složkami proudu. V amplitudovém spektru figurují vyšší harmonické složky lichého řádu. Jelikož se průběh periodicky opakuje, jedná se o ferorezonanci fundamentálního typu.



Ilustrace 34: Popisovaný průběh proudu



Ilustrace 35: Amplitudové spektrum popisovaného průběhu proudu

6 Závěr

Tato práce by měla poskytnout základní informace o jevu zvaném ferorezonance. Je to velmi složitý jev. Vzniká v obvodech, kde figuruje nelineární indukčnost spojená s kapacitou a malými ztrátami, napájenými napěťovým zdrojem. Při vzniku tohoto jevu může dojít k přepětí a nadproudu, a tím k poškození připojeného zařízení.

Závislost indukčnosti na budícím proudu vychází ideálně. Je na ní vidět vzrůstající indukčnost se zvyšujícím se proudem, kdy ještě nedochází k přesycování feromagnetického jádra tlumivky. V okamžiku nasycení jádra indukčnost se stále rostoucím proudem indukčnost monotónně klesá. V-A charakteristika tlumivky získaná výpočtem jasně zobrazuje lineární a saturační část.

Model sériového ferorezonančního obvodu řešený v praktické části této práce je velmi blízký teoretickému předpokladu, kde celkové napětí vykazuje do určitého proudu induktivní, a poté kapacitní charakter. V lineární části V-A charakteristiky nelineární indukčnosti je obvod v normálním stavu. Po přechodu do saturační části nastává ferorezonanční stav.

Chování reálného sériového ferorezonančního obvodu se s jeho modelem zcela neztotožňuje. Avšak je znatelná určitá podobnost mezi výslednými V-A charakteristikami obvodu a jeho modelem. Pro věrohodnější výsledky by bylo vhodné měření na sériovém ferorezonančním obvodě vícekrát opakovat.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] BAŠTA, Jan, Jaroslav CHLÁDEK a Imrich MAYER. *Teorie elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1968.
- [2] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika II*. 4., nezměn. vyd. Praha: Informatorium, 2003, 154 s. ISBN 80-733-3013-X.
- [3] EATON, J.W., Bateman D. a Hauberg S. *GNU Octave: Free your numbers* [online]. Boston: Free Software Foundation, 2011 [cit. 2013-07-22]. Octave documentation, 3. Dostupné z: <http://www.gnu.org/software/octave/octave.pdf>
- [4] Elektro. *Čistě činné zatížení – a přece jalový výkon?*. 2003, roč. 13, č. 12, s. 38-39. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/e1120338.pdf>
- [5] ERBAY, A. *Parameter study of ferro-resonance with harmonic balance method*. Stockholm, 2012. XR-EE-ES 2012:010. Dostupné z: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:550721/FULLTEXT02.pdf>. Diplomová práce. KTH Vetenskap Och Konst, Electrical engineering, Electric Power Systems Lab, Royal Institute of Technology. Vedoucí práce Mohamadreza BARADAR.
- [6] FERRACCI, Philippe. GROUPE SCHNEIDER. *Cahier technique no.190: Ferroresonance* [elektronický časopis]. Technical collection, 1998 [cit. 2013-07-22]. Po bezplatné registraci a přihlášení je plný text dostupný z: <http://electrical-engineering-portal.com/download-center/books-and-guides/schneider-electric/ferroresonance>
- [7] Filtrační tlumivky. MORFI a KASPERLE. *EMG Zlín, s.r.o.* [online]. Zlín: Reality Software, 4.3.2010 [cit. 2013-07-22]. Dostupné z: http://www.emgzlin.cz/menu/tlumivky-filtracni_tlumivky.html
- [8] Choke (electronics). *Wikipedia* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 11.7.2013 [cit. 2013-07-22]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Choke_\(electronics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Choke_(electronics))
- [9] JACOBSON, D.A.N. Examples of ferroresonance in a high voltage power system. 2003 *IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491)* [online]. IEEE, 2003, s. 1206-1212 [cit. 2013-07-25]. DOI: 10.1109/PES.2003.1270499. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1270499>
- [10] MORK, B.A. a D.L. STUEHM. Application of nonlinear dynamics and chaos to ferroresonance in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. vol. 9, issue 2, s. 1009-1017 [cit. 2013-07-22]. DOI: 10.1109/61.296285. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=296285>
- [11] Odrušovací tlumivky. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility* [online]. Brno: Ústav radioelektroniky, 2009 [cit. 2013-07-22]. Dostupné z: http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node18#o:04_02_nahradni_schema_tlumivky
- [12] VAVERDE, V. a A.J. MAZÓN. *Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations* [online]. [cit. 2013-07-22]. Dostupné z: <http://www.icrepq.com/icrepq07/317-valverde.pdf>

Přílohy

Příloha A – Skript programu numerického řešení modelu sériového ferorezonančního obvodu

```

clear
clc
%NACTENI
T=csvread('lo1.csv');
%MAXIMALNI HODNOTY
U=T(3:22,2:4);
I=T(3:22,6:8);
%ss slozka proudu
is=T(3:22,5);
%VSTUPNI KONSTANTY
efkonst=1/sqrt(2);
f=50;
r=0.863;
c=0.000005;
xc=1/(2*pi*f*c);
%EFEKTIVNI HODNOTY
Ue=efkonst*U;
Ie=efkonst*I;
%zakladni vlna
uz=Ue(:,1);
iz=Ie(:,1);
%vyssi harmonicke
for a=1:size(Ue,1)
    pom=0;
    pom1=0;
    for b=2:size(Ue,2)
        pom=Ue(a,b)^2+pom;
        pom1=Ie(a,b)^2+pom1;
    end
    uh(a)=sqrt(pom);
    ih(a)=sqrt(pom1);
%celkove efektivni hodnoty
    u(a)=sqrt(uz(a)^2+uh(a)^2);
    i(a)=sqrt(is(a)^2+iz(a)^2+ih(a)^2);
end
%NAPOCITANI
for d=1:length(u)
    p(d)=r*i(d)^2;
    s1(d)=u(d)*iz(d);%zdanlivy vykon zakladni vlny
    q1(d)=sqrt(s1(d)^2-p(d)^2);%jalovy vykon zakladni vlny
    pd(d)=u(d)*sqrt(is(d)^2+ih(d)^2);%deformacni vykon
    s(d)=sqrt(p(d)^2+q1(d)^2+pd(d)^2);%celkovy zdanlivy vykon
    q(d)=sqrt(q1(d)^2+pd(d)^2);%jalovy vykon
    xl(d)=q(d)/i(d)^2;
    l(d)=xl(d)/(2*pi*f);
    w(d)=40;
end
%NAPETI
for h=1:length(u)
    ur(h)=r*i(h);
    uc(h)=xc*i(h);
    ul(h)=xl(h)*i(h);
    u1(h)=sqrt(ur(h)^2+(ul(h)-uc(h))^2);

```

```

end
%UKLADANI VYKONU
uloz=fopen('sno4.txt','w');
    fprintf(uloz, 'S [VA]\tP [W]\tQ [Var]\tPd [VAd]\tL [H]\n');
for g=1:length(s)
    fprintf(uloz, '%f\t%f\t%f\t%f\n',s(g),p(g),q(g),pd(g),l(g));
end
fclose(uloz);
%GRAF INDUKCNOSTI
figure(10)
plot(i,l,'r')
    title('Staticka charakteristika L=f(i)');
    xlabel('I [A]');
    ylabel('L [H]');
    grid on
saveas(10,'sno4l','svg');
%GRAF NAPETI
figure(11)
plot(i,u1,'g',i,uc,i,u1,'r',i,w,'--');
    title('V-A charakteristika namodelovaneho serioveho
ferorezonancniho RLC');
    xlabel('I [A]');
    ylabel('U [V]');
    legend('celkove napeti','napeti na kondenzatoru','napeti na
indukcnosti');
    grid on
saveas(11,'sno4u','svg');
%GRAF PREVODNI
figure(12)
plot(u1,u1)
    title('Prevodni charakteristika');
    xlabel('U [V]');
    ylabel('U1 [V]');
    grid on
saveas(12,'sno4p','svg');
%GRAF REAKTANCE
figure(13)
plot(i,xl,'g');
    title('Staticka charakteristika indukcní reaktance tlumivky');
    xlabel('I [A]');
    ylabel('Xl [Ohm]');
    grid on
saveas(13,'sno4x','svg');

```

Příloha B – Skript programu numerického řešení sériového ferorezonančního obvodu

```

clear
clc
%NACTENI
T=csvread('sol.csv');
%MAXIMALNI HODNOTY
U=T(3:22,2:6);
I=T(3:22,8:15);
%VSTUPNI KONSTANTY
efkonst=1/sqrt(2);
f=50;
r=0.863;
c=0.000005;
xc=1/(2*pi*f*c);
%EFEKTIVNI HODNOTY
Ue=efkonst*U;
Ie=efkonst*I;
%ss slozka proudu
is=T(3:22,7);
%zakladni vlna
uz=Ue(:,1);
iz=Ie(:,1);
%vyssi harmonicke
for a=1:size(Ue,1)
    pom=0;
    for b=2:size(Ue,2)
        pom=Ue(a,b)^2+pom;
    end
    uh(a)=sqrt(pom);
    pom=0;
    for d=2:size(Ie,2)
        pom=Ie(a,d)^2+pom;
    end
    ih(a)=sqrt(pom);
%celkove efektivni hodnoty
    u(a)=sqrt(uz(a)^2+uh(a)^2);
    i(a)=sqrt(is(a)^2+iz(a)^2+ih(a)^2);
end
%NAPOCITANI VYKONU
for g=1:length(u)
    p(g)=r*i(g)^2;
    s1(g)=u(g)*iz(g);%zdanlivy vykon zakldni vlny
    q1(g)=sqrt(s1(g)^2-p(g)^2);%jalovy vykon zakldni vlny
    pd(g)=u(g)*sqrt(is(g)^2+ih(g)^2);%deformacni vykon
    s(g)=sqrt(p(g)^2+q1(g)^2+pd(g)^2);%celkovy zdanlivy vykon
    q(g)=sqrt(q1(g)^2+pd(g)^2);%jalovy vykon
    x(g)=(q(g)/i(g)^2)-369.12;
end
%NAPETI
for k=1:length(u)
    ur(k)=r*i(k);
    %ux(k)=sqrt(q(k)*x(k));
    ux(k)=x(k)*i(k);
    ul(k)=sqrt(ur(k)^2+ux(k)^2);
end
%UKLADANI VYKONU

```


Příloha C

	U [V]			I [A]			
	1. harmonická	3. harmonická	5. harmonická	ss složka	1. harmonická	3. harmonická	5. harmonická
1	327.989925	12.008087	2.593801	0.010880	0.644615	0.251617	0.062720
2	316.048578	10.478751	3.176253	0.008180	0.561050	0.212859	0.053826
3	303.374462	9.263243	3.450375	0.011920	0.493467	0.182123	0.047599
4	287.674721	6.057219	2.395168	0.005752	0.425350	0.150056	0.041728
5	275.466951	6.474087	3.705518	0.001952	0.377242	0.128124	0.038219
6	260.908013	5.327651	3.516957	0.006152	0.328375	0.105166	0.033801
7	247.498726	4.862472	3.165030	0.004912	0.290230	0.085392	0.028996
8	234.386609	4.030543	3.525642	0.006336	0.257536	0.070127	0.024532
9	221.444097	3.265936	3.489731	0.004376	0.232884	0.056608	0.018629
10	208.734315	3.014905	3.410967	0.006384	0.211137	0.048122	0.014878
11	194.849610	2.482780	3.168628	0.006024	0.192410	0.040474	0.011628
12	178.490037	2.037102	3.188524	0.009400	0.174391	0.032760	0.009899
13	164.735688	1.927982	2.868303	0.008844	0.161047	0.029701	0.008633
14	139.064498	1.431170	2.635466	0.008144	0.138100	0.023654	0.006311
15	121.955374	1.188612	2.252308	0.010496	0.125575	0.019837	0.006001
16	110.007599	1.071298	2.042502	0.007180	0.116019	0.017364	0.004850
17	96.104368	0.893526	1.708163	0.003856	0.105332	0.014389	0.004616
18	81.953755	0.933665	1.591668	0.004618	0.096496	0.013034	0.003527
19	68.253557	0.815604	1.251409	0.006538	0.088212	0.011650	0.003149
20	54.953611	0.659125	1.022908	0.003080	0.077962	0.009270	0.002211

Tabulka 2: Amplitudy napětí a proudu v zapojení se samotnou tlumivkou

Příloha D

	U [V]										I [A]									
	1. harmonická	3. harmonická	5. harmonická	7. harmonická	9. harmonická	ss složka	1. harmonická	3. harmonická	5. harmonická	7. harmonická	9. harmonická	11. harmonická	13. harmonická	15. harmonická						
1	330.556969	6.491389	4.718817	2.415908	2.117220	0.051320	0.718512	0.416880	0.213148	0.103073	0.052790	0.028479	0.017228	0.008643						
2	319.671747	6.362237	5.168211	1.746926	2.059464	0.049580	0.706454	0.405399	0.203596	0.099160	0.050666	0.027273	0.016008	0.009504						
3	303.767166	6.174776	5.485943	1.015706	2.066335	0.048300	0.685877	0.385174	0.189395	0.088341	0.044388	0.023553	0.013876	0.008457						
4	290.199807	5.975598	4.836730	1.662565	1.550850	0.049080	0.666561	0.368231	0.175918	0.080861	0.041353	0.022520	0.013978	0.008217						
5	275.851953	5.874338	5.932701	0.749402	2.181463	0.052460	0.643784	0.346642	0.160149	0.071280	0.034086	0.018415	0.011232	0.006705						
6	262.454383	5.519046	5.577729	0.601336	2.090648	0.050800	0.623181	0.330892	0.151754	0.065853	0.032004	0.017302	0.010508	0.005231						
7	246.917896	5.228438	5.781504	0.763184	1.600993	0.049700	0.597457	0.309276	0.136076	0.055280	0.026878	0.014752	0.008988	0.004978						
8	222.030320	13.413734	9.799815	3.215914	1.116489	0.052520	0.548962	0.261366	0.103059	0.037616	0.017511	0.008909	0.005605	0.003430						
9	208.267098	12.547930	8.614950	3.259892	0.588873	0.051700	0.519446	0.240583	0.091926	0.031945	0.015760	0.005934	0.005270	0.002559						
10	193.550280	11.671402	7.446631	2.209925	0.470781	0.051060	0.485751	0.220005	0.082089	0.026566	0.011550	0.006090	0.003562	0.003495						
11	177.987370	10.359662	5.186245	2.262359	0.613122	0.052380	0.444590	0.193244	0.072720	0.020263	0.006311	0.004648	0.003625	0.002254						
12	164.944849	8.938002	2.567510	1.496411	1.031315	0.020184	0.402428	0.168170	0.063665	0.018022	0.005128	0.003241	0.002349	0.002557						
13	152.786926	6.389667	1.553957	1.063846	0.523955	0.018888	0.320715	0.119238	0.046264	0.015753	0.004768	0.000648	0.001601	0.002351						
14	144.010018	2.750131	2.702759	0.852507	0.430967	0.016644	0.206951	0.052007	0.016329	0.006896	0.002425	0.001187	0.001362	0.000562						
15	119.157904	1.569340	2.525518	0.974354	0.582719	0.016204	0.154038	0.029861	0.007130	0.003455	0.000840	0.000139	0.000495	0.000891						
16	105.773691	1.275423	1.888271	0.646376	0.275493	0.008816	0.135880	0.023450	0.005557	0.000956	0.000957	0.000738	0.001335	0.000200						
17	94.482048	1.139520	1.625207	0.533191	0.235567	0.008188	0.123470	0.019673	0.004344	0.001198	0.000889	0.000688	0.000900	0.000381						
18	80.187259	0.997364	1.747933	0.796176	0.427209	0.006848	0.110711	0.017957	0.003645	0.001276	0.000686	0.000748	0.000924	0.000469						
19	67.222658	0.909449	1.350490	0.649910	0.347208	0.007146	0.099019	0.013643	0.003649	0.001517	0.000712	0.000889	0.000396	0.000543						
20	54.256622	0.761569	0.918297	0.382184	0.236893	0.009692	0.085627	0.011220	0.003372	0.001546	0.000574	0.000379	0.000382	0.000274						

Tabulka 3: Amplitudy napětí a proudu v zapojení se sériovým ferorezonančním obvodem