

Využití rezonance v silnoproudé elektrotechnice

© Ing. Ladislav Kopecký, 24.11.2013

Tento článek předpokládá znalost teorie obvodů a základů vyšší matematiky, ale většinu textu se dá porozumět i bez těchto znalostí.

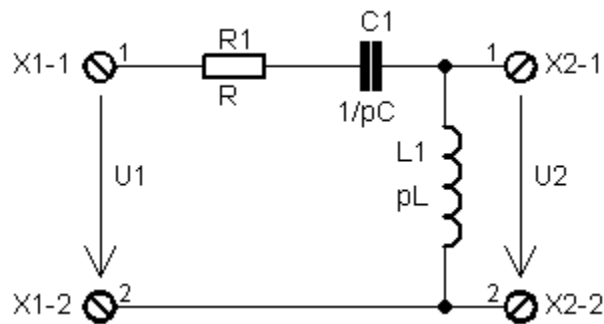
1. Úvod

Fyzikální jev rezonance je ve vědě a technice již dlouho dobře znám a podrobně prostudován. Technici se jí většinou vyhýbají, neboť jim způsobuje mnohdy nečekané problémy. V radiotechnice je potom základním principem, bez něhož bychom si nemohli naladit ani oblíbenou stanici na rádiu, o televizi, mobilech a dalších komunikačních zařízeních nemluvě.

My se však na rezonanci podíváme z nového, pro mnohé nečekaného úhlu pohledu a budeme se snažit najít její uplatnění v netradičních oblastech, kde – stejně jako v komunikační technice – má rovněž obrovský potenciál.

2. Teorie rezonance

V této práci se budeme zabývat výhradně elektrickou sériovou rezonancí. Sériový rezonanční obvod najdete na obr. 1.



Obr. 1

V článku <http://free-energy.xf.cz/teorie/free-energy.pdf> byla provedena analýza tohoto obvodu a odvozen napěťový přenos v rezonanci

$$A_u(j\omega_r) = U_2 / U_1 = j\sqrt{L/C} / R \quad (1)$$

Pokud zaměníme pozici cívky L1 a kondenzátoru C1 (obr. 2), můžeme analogicky sestavit rovnici pro obrazový Laplaceův přenos:

$$A_u(p) = 1 / (p^2LC + pRC + 1) \quad (2)$$

Když Laplaceův operátor p nahradíme operátorem frekvenčního přenosu

$$p = j\omega \quad (3)$$

kde j je imaginární jednotka a ω je úhlový kmitočet, dostaneme vztah pro napěťový přenos jako funkci úhlového kmitočtu ω :

$$A_u(j\omega) = 1 / ((1 - \omega^2 LC) + j\omega RC) \quad (4)$$

Ve vztahu (4) máme ve jmenovateli komplexní číslo s reálnou a imaginární částí. Abychom se jej zbavili a mohli vztah převést na reálnou a imaginární část v čitateli, čitatele a jmenovatele zlomku vynásobíme komplexním číslem $(1 - \omega^2 LC) - j\omega RC$ a dostaneme:

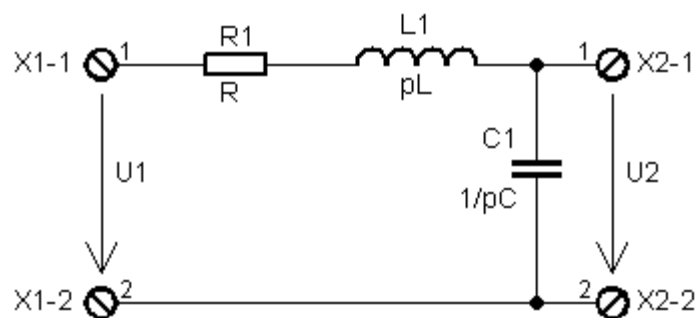
$$A_u(j\omega) = ((1 - \omega^2 LC) - j\omega RC) / ((1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega RC)^2)$$

A když položíme

$$1 - \omega^2 LC = 0 \quad (5)$$

a dosadíme za $\omega = 1 / \sqrt{LC}$, získáme výsledný vztah pro napěťový přenos v rezonanci:

$$A_u(j\omega_r) = U_2/U_1 = -j\sqrt{L/C}/R \quad (6)$$



Obr. 2

Porovnáme-li vztahy (1) a (6), zjistíme, že se liší pouze ve znaménku pře písmenem „j“. Co to znamená? Znamená to, že proti harmonickému napětí zdroje

$$U_1(t) = U \sin(\omega t) \quad (7)$$

je U_2 zpožděno o úhel $\pi/2$ (90°), zatímco v předchozím případě napětí na cívce napětí zdroje o úhel $\pi/2$ (90°) předbíhá. Z toho dále plyne, že napětí na cívce a napětí na kondenzátoru jsou v protifázi (posunuty o úhel π , tj. 180°) a mají stejně velkou amplitudu.

Ze vztahu (5) odvodíme vzorec pro rezonanční kmitočet:

$$\omega^2 = (2\pi f)^2 = 1 / LC$$

$$f = 1 / (2\pi\sqrt{LC}) \quad (8)$$

což je známý Thompsonův vzorec.

Ve výše zmíněném článku je také odvozen vztah pro impedanci v rezonanci. Zde provedeme odvození jednodušším způsobem. Obrazová impedance sériového rezonančního obvodu je

$$Z(p) = R + pL + 1/pC$$

Opět dosadíme za operátor p operátor frekvenčního přenosu $j\omega$:

$$Z(j\omega) = R + j\omega L + 1/j\omega C$$

U posledního členu na pravé straně s j ve jmenovateli rozšíříme zlomek vynásobením čitatele a jmenovatele imaginární jednotkou „ $-j$ “ a dostaneme:

$$Z(j\omega) = R + j(\omega L - 1/\omega C) \quad (9)$$

Když

$$\omega L - 1/\omega C < 0,$$

má impedance kapacitní charakter, když

$$\omega L - 1/\omega C > 0,$$

má impedance induktivní charakter a když

$$\omega L - 1/\omega C = 0 \quad (10)$$

je obvod v rezonanci a impedance má činný charakter a platí

$$Z(j\omega_r) = R \quad (11)$$

Jinými slovy: když je kmitočet nižší než rezonanční, impedance má kapacitní charakter a když je kmitočet vyšší než rezonanční, má impedance Z induktivní charakter. Přemýšlivému čtenáři je již jasné, že rovnice (10) je jen jiný tvar rovnice (5).

Na závěr teoretické části si pro ilustraci spočítáme jednoduchý příklad. Máme sériový rezonanční obvod podle obr. 2, kde $R = 12\Omega$, $L = 1\text{mH}$ a $C = 100\text{nF}$. Obvod je připojen k ideálnímu zdroji harmonického napětí o amplitudě 12V . U zdroje lze plynule měnit frekvenci. Naším úkolem bude spočítat, při jakém kmitočtu bude obvod v rezonanci, jak velký bude při rezonančním kmitočtu protékat obvodem proud a jak velká bude amplituda napětí na výstupu.

Řešení:

Pro určení rezonančního kmitočtu použijeme vzorec (8):

$$f = 1 / (2\pi\sqrt{LC}) = 1 / (2\pi\sqrt{(10^{-3} \cdot 10^{-7})}) = 15915,5\text{Hz}$$

Perioda je

$$T = 1/f = 62,832\mu\text{s}$$

Amplitudu proudu vypočítáme jednoduše pomocí Ohmova zákona:

$$I = U/R = 12\text{V} / 12\Omega = 1\text{A}$$

Amplitudu výstupního napětí U_2 vypočítáme ze vztahu pro přenos (6)

$$A_u(j\omega_r) = U_2/U_1 = -j\sqrt{L/C}/R$$

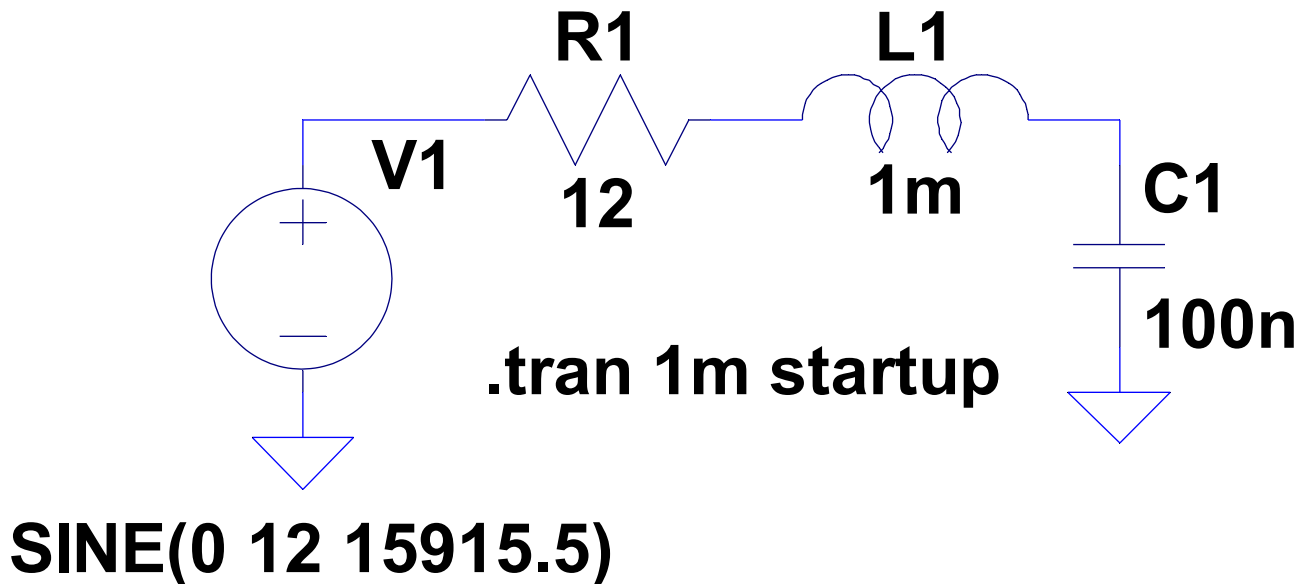
$$U_2 = U_1 \cdot |A_u(j\omega_r)| = U_1 \cdot \sqrt{L/C}/R \quad (12)$$

$$|A_u(j\omega_r)| = \sqrt{L/C}/R = \sqrt{(10^{-3} \cdot 10^{-7})}/12 = 100/12$$

$$U_2 = U_1 \cdot |A_u(j\omega_r)| = 100\text{V}$$

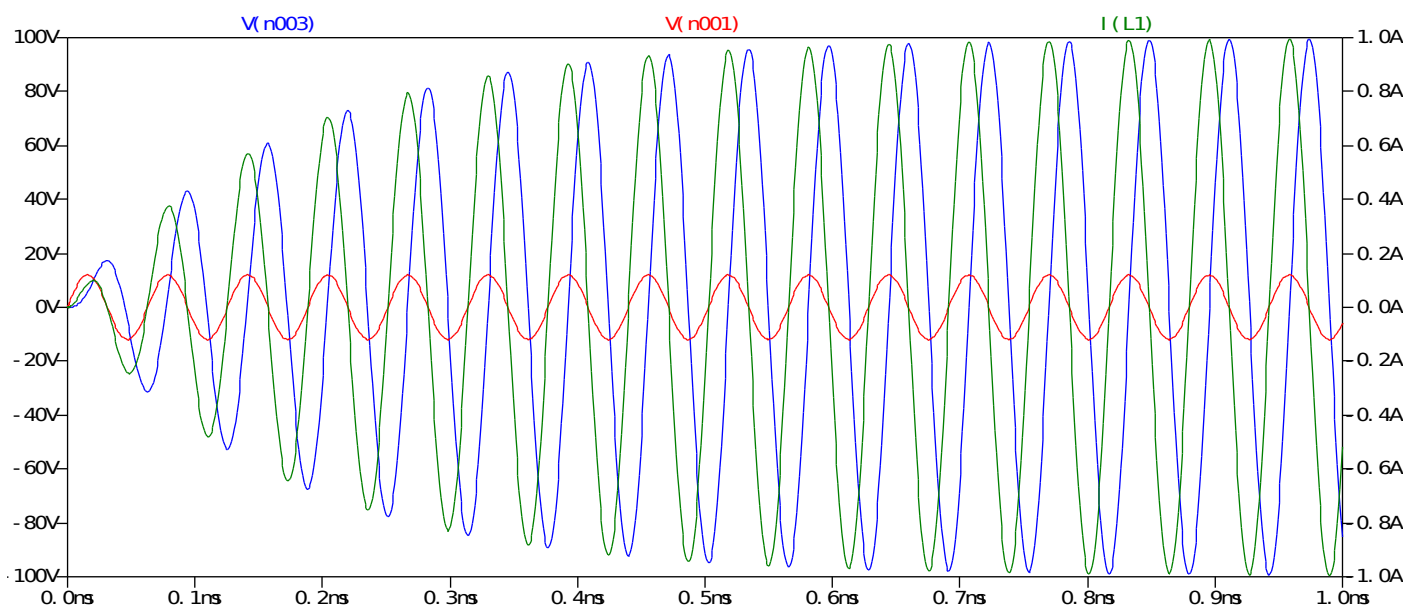
3. Simulace

Nyní je čas teoretické závěry ověřit v praxi. Abychom se vyhnuli potřebě laboratorních přístrojů, elektronických součástek a dalšího vybavení, vystačíme si simulací. Na obr. 3 je schéma z obr. 2 překresleno pomocí simulačního programu LT Spice.



Obr. 3

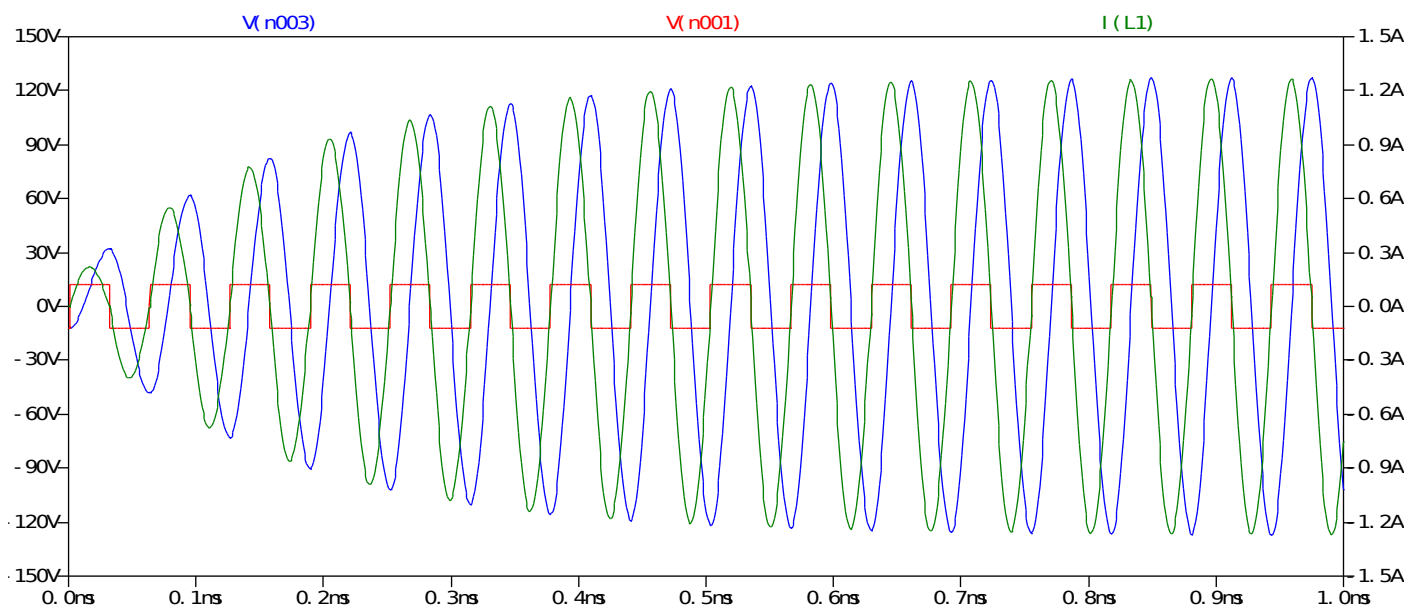
Na obr. 3 se můžeme přesvědčit, že jako hodnoty součástek jsme použili výsledky z předchozího příkladu, včetně amplitudy a kmitočtu zdroje. Nyní se podíváme na výsledek simulace:



Obr. 4

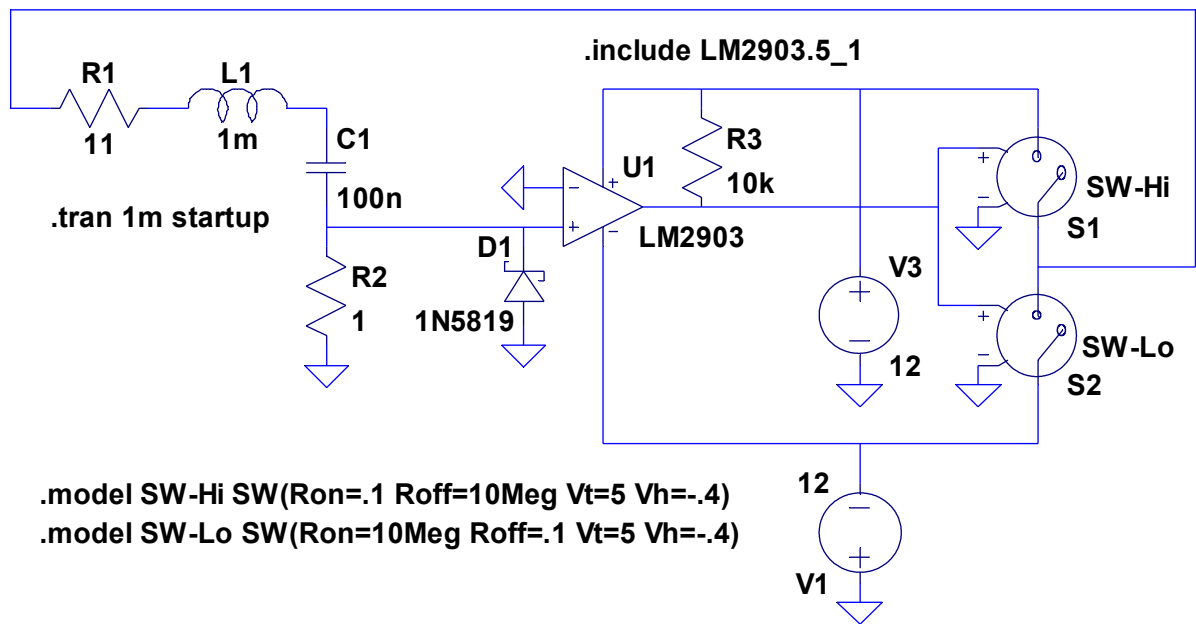
Na obr. 4 se můžeme přesvědčit, že amplituda proudu je skutečně 1A, amplituda napětí na výstupu je 100V, že průběh napětí na výstupu (modrá) je proti vstupu (červená) posunut o 90 stupňů a že proud (zelená) je s napětím zdroje ve fázi. Poslední poznatek svědčí o tom, že zátěž se ze zdroje jeví jako činná. To má pro naše další úvahy mimořádný význam. Zprvė nám umožní automaticky naladit a udržovat rezonanci a také zkonstruovat stroje s velmi zajímavými vlastnostmi.

Pro realizaci zdroje sinusového napětí bychom potřebovali točivý generátor připojený na motor, u něhož bychom mohli plynule měnit otáčky. To by bylo velmi drahé a nepraktické, proto najdeme jiný, jednodušší způsob: rezonanční obvod budeme budit obdélníkovými impulzy. Nahradíme tedy zdroj na obr. 3 zdrojem obdélníkového průběhu. Abychom mohli snadno porovnávat, bude mít tento zdroj stejnou amplitudu, tj. 12V, i kmitočet, a bude nabývat jak kladných, tak záporných hodnot napětí. Pro výsledek se podívejme dolů na obr. 5:



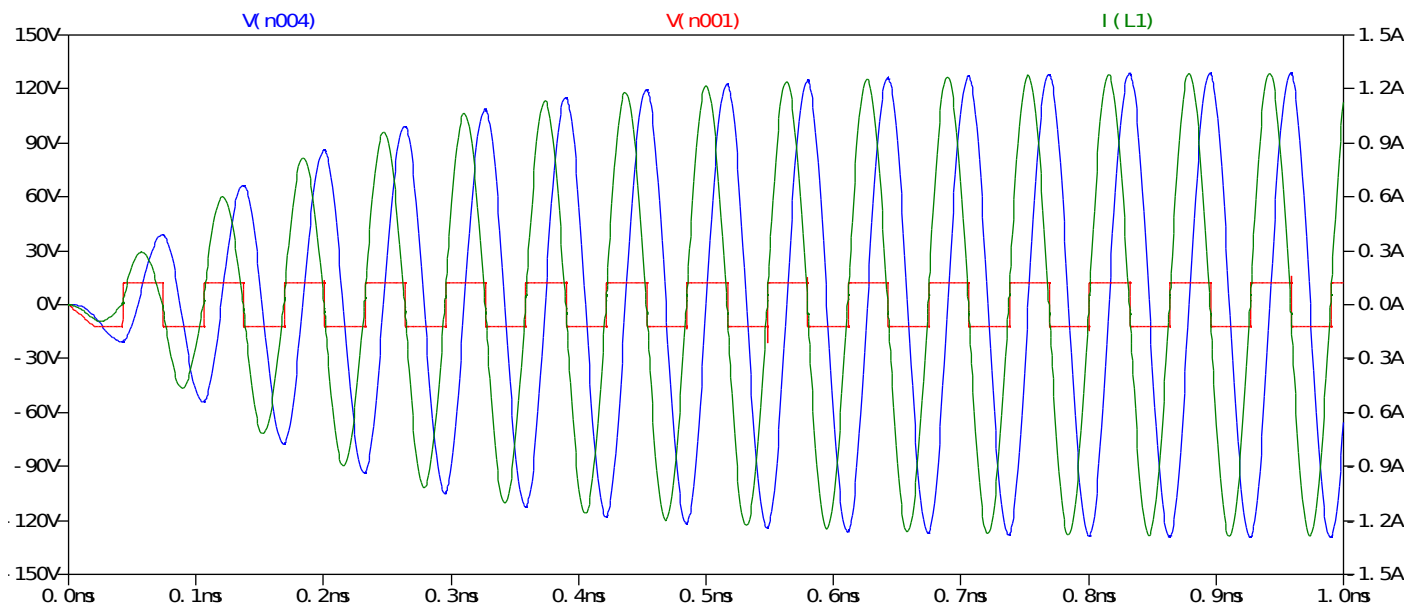
Obr. 5

Vidíme, že amplitudy proudu i napětí vzrostly více než o čtvrtinu (cca o 27%). Je to způsobeno působením vyšších harmonických, které jsou v obdélníkovém průběhu obsaženy. Tento poznatek využijeme ke konstrukci oscilátoru, buzeného obdélníkovým průběhem. Jednu z možných variant najdete na obr. 6:



Obr. 6

Nyní si obvod na obr. 6 popíšeme. Vidíme, že v obvodu přibyl odpor R2, který je jedním koncem připojen na vstup komparátoru U1, a že k výstupu tohoto komparátoru je připojena dvojice spínačů S1, S2, jež nahrazuje střídavý zdroj napětí. Když si uvědomíme, jaké jsou průběhy napětí a proudů v rezonančním obvodu (obr. 5), funkce zařízení na obr. 6 je zcela zřejmá a není k tomu třeba cokoli vysvětlovat. Na obr. 7 se můžete podívat na výsledky simulace, které jsou téměř shodné s obr. 5:



Obr. 7

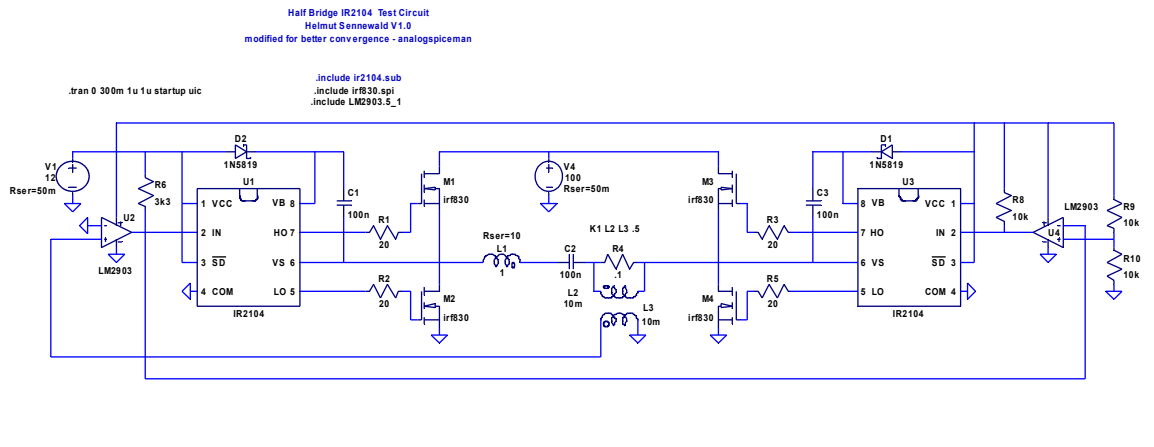
V tomto případě však obě amplitudy vzrostly dokonce téměř o 29%. Je to způsobeno tím, že jsme se předtím při zadávání frekvence generátoru dopustili zaokrouhlovací chyby.

Na závěr této části dokumentu uvedeme reálnější simulaci s modely skutečných součástek a kde je místo dvou zdrojů a půlmůstku použit zdroj jeden a úplný H-můstek se čtyřmi elektronickými spínači:

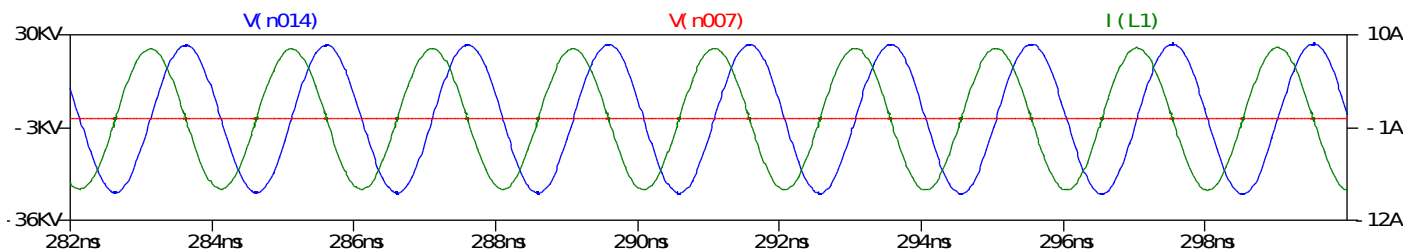
```

* IR2104 Behavioral Model by analog@ieee.org
.subckt IR2104 Vcc In SD Com VB HO VS LO
C1 Com In 10p Rpar=1e6
D2 Com In Dd
D1 In Vcc Dd
A1 In Com 0 0 2 1 0 SCHMITT Vt=1.9 Vh=-1
+ Trise=1110n Tfall=100n Tripd=50n
A2 VB VS 0 0 0 3 0 SCHMITT Vt=8.9 Vh=-35
A3 3 1 0 6 7 5 4 0 AND Trise=100n Tripd=20n
S1 HO VB 4 0 SH
C2 HO VB 22p
D3 HO VB Dd
S2 HO VS 5 0 SL
C3 HO VS 22p Rpar=100k
D4 VS HO Dd
D5 VS VB 25V
D6 Com VB 625V
C4 Com SD 10p Rpar=1e6
D8 Com SD Dd
D7 SD Vcc Dd
A4 SD Com 0 0 0 6 0 SCHMITT Vt=1.9 Vh=-1
+ Trise=120n Tfall=25n
A5 Vcc Com 0 0 0 7 0 SCHMITT Vt=8.9 Vh=-35
A6 7 6 0 2 0 9 8 0 AND Trise=100n Tripd=20n
S3 LO Vcc 8 0 SH
C5 LO Vcc 22p
D9 LO Vcc Dd
S4 LO Com 9 0 SL
C6 LO Com 22p Rpar=100k
D10 Com LO Dd
D11 Com Vcc 25V
.model Dd D(Ron=.5 Vfwd=.5)
.model 25V D(Ron=.5 Vfwd=.5 Vrev=25.2 Roff=25e4)
.model 625V D(Ron=.5 Vfwd=.5 Vrev=625 Roff=12e6)
.model SH SW(Vt=.5 Vh=-.5 Ron=42 Ilimit=.21)
.model SL SW(Vt=.5 Vh=-.5 Ron=20 Ilimit=.36)
.ends IR2104

```



Obr. 8



Obr. 9

4. Využití rezonance v elektrotechnice

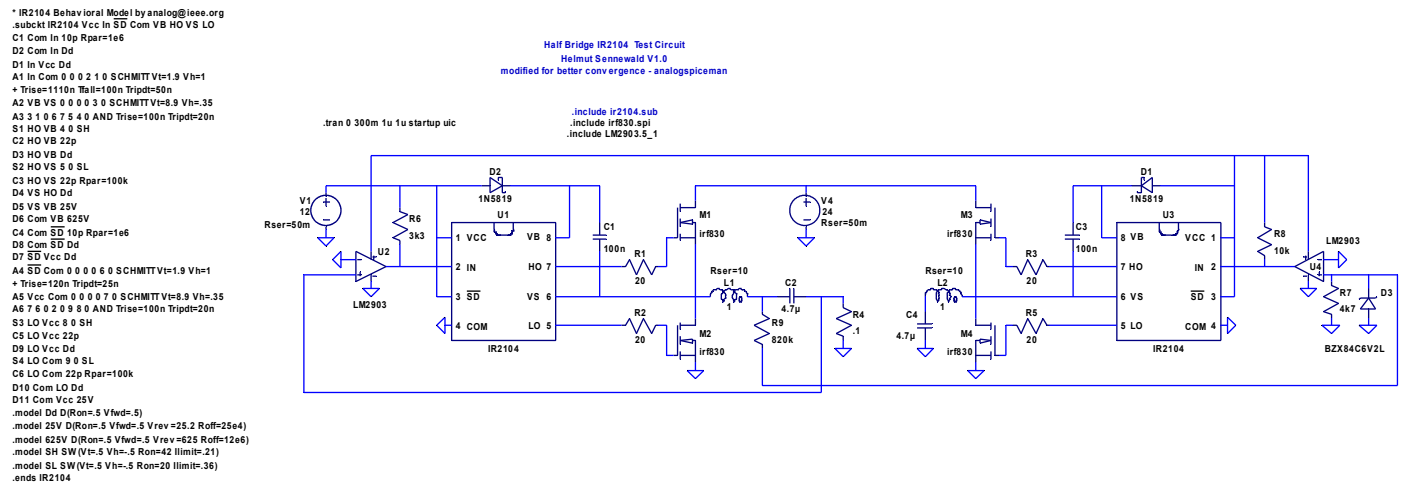
Využití sériové rezonance v této oblasti vidím především u motorů na střídavý proud, které lze pomocí výše popsaného rezonančního oscilátoru napájet ze stejnosměrného zdroje. U jednofázových a dvoufázových indukčních motorů lze použít velmi jednoduchou elektroniku. U třífázových strojů je situace trochu komplikovanější, neboť vytvořit fázový posun 120° pro širší rozsah rezonančních kmitočtů není úplně jednoduché. Vytvořit fázový posun 90° pro dvoufázové rezonanční řízení je naproti tomu velmi snadné, jak si ukážeme dále. Rezonančně řídit trojfázový motor však lze snadno pomocí mikroprocesoru. Také jsem experimentoval s využitím fázového závěsu, ale proti mikroprocesorovému řízení je toto řešení komplikovanější a méně spolehlivé.

Obecně platí, že pro konstrukci rezonančně řízeného motoru použijeme takové materiály a principy, které zachovají vysoký činitel jakosti rezonančního obvodu. To znamená, že například pro magnetický obvod použijeme materiály, které mají nízké ztráty vířivými proudy. Dále použijeme jakostní konzátory s nízkým ESR (ekvivalentní sériový odpor).

4.1. Asynchronní motor

Řídit rezonančně jednofázový a dvoufázový asynchronní motor je velmi snadné. Jedinou nevýhodou je jeho kotva nakrátko, která při mechanickém zatížení hřídle v důsledku zvětšeného skluzu snižuje činitel jakosti rezonančního obvodu. Takže tady nám příliš nepomůže, použijeme-li pro magnetický obvod speciální

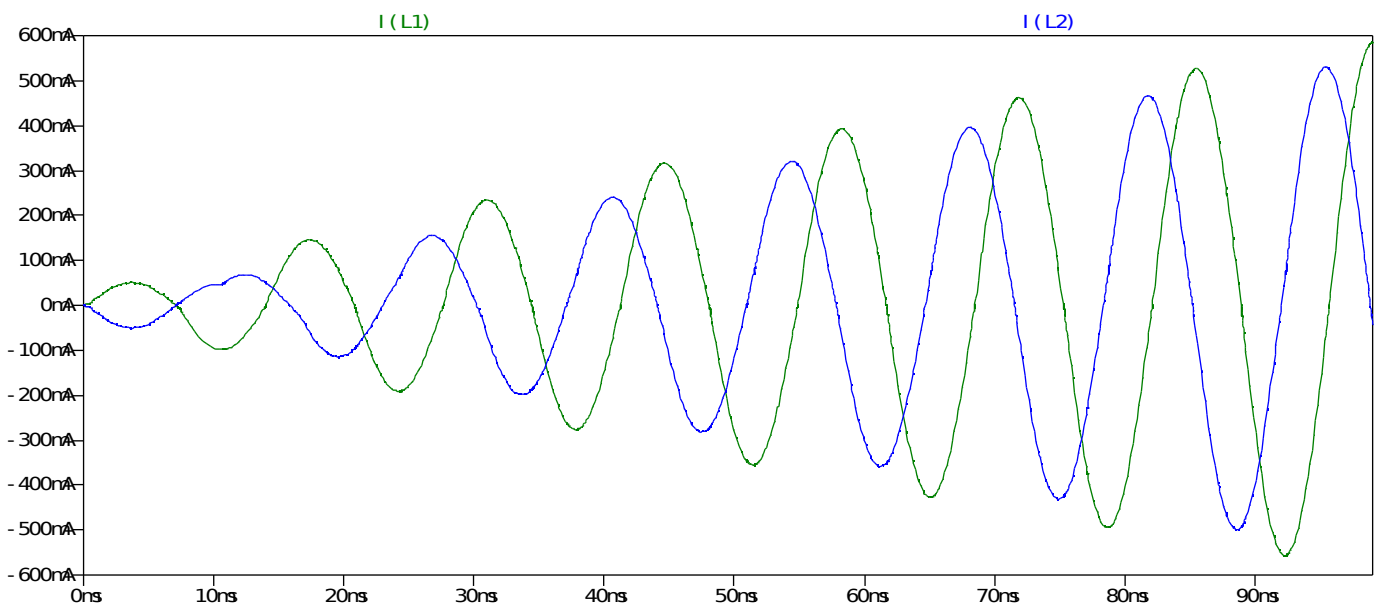
materiál potlačující vířivé proudy. Na obr. 10 můžete vidět schéma zapojení elektroniky pro rezonanční řízení dvoufázového motoru:



Obr. 10

Funkce zapojení na obr. 10 je velmi jednoduchá: fázového posunu o 90° je dozaženo tak, že druhý komparátor je řízen napětím na rezonančním kondenzátoru, které je proti proudu posunut právě o 90° . Úroveň napětí pro komparátor je upravena pomocí odporového děliče. Dále je ke vstupu komparátoru připojena ochranná Zenerova dioda.

Na dalším obrázku je zobrazen výstup simulace, kde jsou zobrazeny průběhy proudů obou rezonančních obvodů. Všimněte si, že fázový posun je cca 90° a amplituda proudu druhé cívky je o něco nižší. Je to způsobeno tím, že vlivem přechodového děje ještě nedošlo k ustálenému stavu.



Obr. 11

4.2. Synchronní motor

Výše uvedenou nevýhodu odstraňuje synchronní motor, který v rotoru nemá kotvu nakrátko, ale permanentní magnety. Z principu by měl mít při použití vhodných materiálů vyšší účinnost. Jeho nevýhodou však je, že je nutné ho nějak roztočit na synchronní otáčky.

4.3. Stejnoseměrný motor s elektronickou komutací

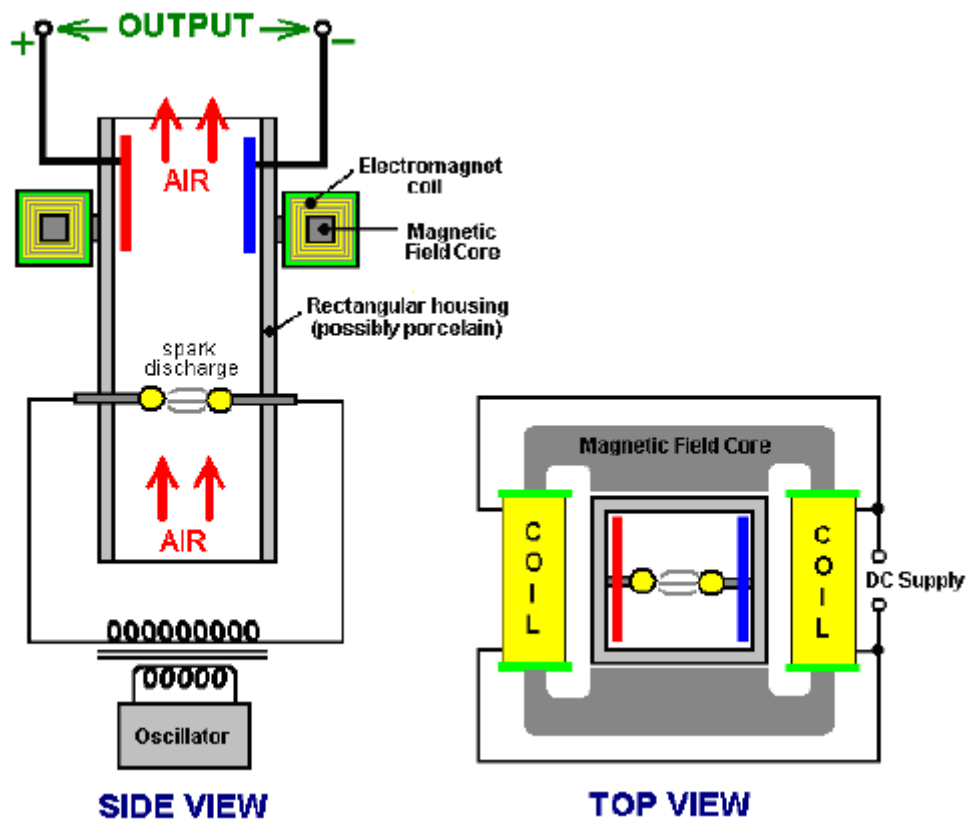
Dále je možné rezonančně řídit stejnosměrný motor s elektronickou komutací, označovaný zkratkou EC (Electronic Commutation) nebo BLDC (BrushLess DC). Zde však z principu nelze LC oscilátor použít, protože elektronika řídí spínání proudu do jednotlivých vinutí v závislosti na poloze rotoru. Zde by rezonanční řízení probíhalo tak, že po dosažení rezonančních otáček by se do série s vinutím zařadil kondenzátor o vhodné kapacitě. Rezonance by se udržovala řízením otáček změnou zatížení motoru. Nejsnáze lze toto zařídit pomocí generátoru s řízenou zátěží. U EC motoru speciální konstrukce lze generátor zařadit přímo do motoru. Vhodnou konstrukcí EC motoru ve funkci motorgenerátoru je použití diskového rotoru s plochými permanentními magnety ve tvaru hranolu nebo válce. Lze použít například feritové nebo neodymové magnety. V prvním případě pro konstrukci mag. obvodu použijeme ferit, v druhém případě mohou být cívky vzduchové nebo lze použít nějaký vhodný materiál se sycením kolem 1,5T. Takové materiály však bývají buď drahé (např. Metglass), nebo jsme nuceni improvizovat s nejistým výsledkem.

4.4. Výroba vysokého napětí

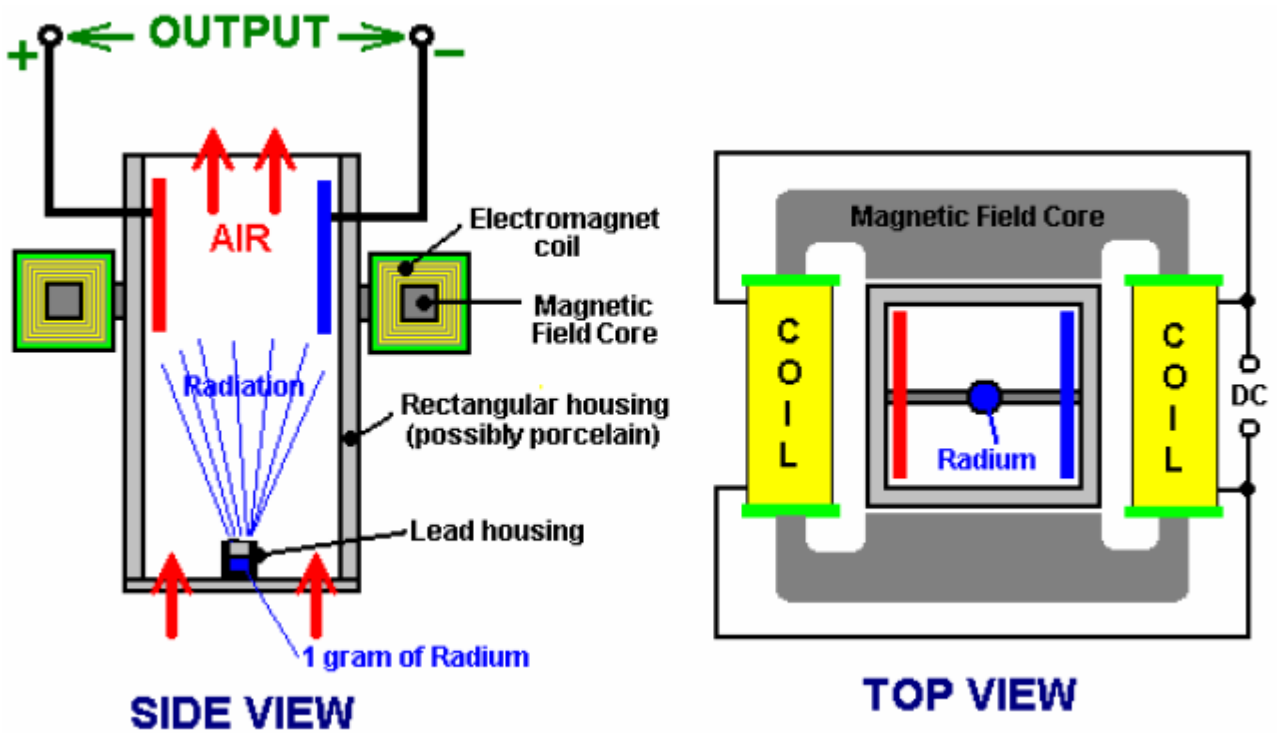
Rezonančního LC oscilátoru lze také s úspěchem použít pro výrobu vysokého napětí pro nejrůznější účely. Zde se můžeme nechat inspirovat výzkumy Nikoly Tesly. Například Patrick Kelly popisuje na svém webu <http://www.free-energy-info.co.uk/> zařízení (obr. 12), které údajně vynalezl právě Tesla. Není to však jisté, neboť si jej nikdy nedal patentovat. V podstatě se jedná o výrobu iontů pomocí vysokého napětí. Tyto ionty jsou potom vychylovány magnetickým polem a zachycovány dvojicí plochých elektrod.

Vysokonapěťový ionizátor vzduchu lze nahradit zdrojem ionizujícího záření, jak ilustruje obrázek 13.

Místo radia můžeme použít třeba thorium, o němž se uvažuje jako o náhradě za nebezpečný a snadno zneužitelný uran. Britské listy před dvěma lety psaly o potlačování vynálezu thoriové baterie zde: <http://www.blisty.cz/art/59645.html>. Domnívám se, že vynálezci, o nichž je v článku řeč, využili právě tohoto jednoduchého principu.



Obr. 12



Obr. 13

