

REZONANČNÍ MOTOR *for dummies*

(c) Ing. Ladislav Kopecký, srpen 2015

Tento článek vznikl na základě diskuse pod článkem [Rezonanční motor – zdroj energie budoucnosti II](#) na serveru NWO, který můj článek převzal. Článek byl hojně komentován a musím bohužel konstatovat, že málokdo je schopen chápat nejen základy elektrotechniky, ale dokonce i elementární logiky. Těmto lidem vycházím vstříc a pokusím se rezonanční motor vysvětlit tak, aby jeho podstatu byl schopen pochopit každý, kdo je schopen elementárního pochopení psanému textu a umí provádět základní početní operace pomocí kalkulačky. Text bude obsahovat nutné minimum vzorečků, které budou uvedeny bez důkazů, ověření jejich platnosti provedeme pomocí simulací. V diskusi občas zazněl názor, že se na simulace simulace nelze spolehnout. Zde si ukážeme, že simulace pomocí programu LTSpice je dostatečně přesná a že se poměrně přesně shoduje s výpočty. Patentové úřady již dokonce simulace připouštějí jako důkaz funkčnosti zařízení, jež je předmětem patentového řízení. Vezměte si tedy k ruce kalkulačku a jdeme na to.

Použijeme parametry reálného jednofázového motoru, jež převezmeme z článku [Návrh rezonančního řízení jednofázového motoru](#). V článku jsme spočítali a změřili, že vinutí motoru má tyto parametry: indukčnost $L = 1,492\text{H}$ a činný odpor je $R = 34\Omega$. Dále jsme změřili, že efektivní hodnota napětí sítě $U_{ef} = 235\text{V}$. Nyní provedeme simulaci, kterou ověříme výpočtem. Spočítáme amplitudu proudu procházejícího motorem a ověříme ji pomocí simulace. K tomu budeme potřebovat vypočítat impedanci Z motoru:

$$Z = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} = \sqrt{(2\pi \cdot f \cdot L)^2 + R^2}$$

kde $\omega = 2\pi \cdot f$ je úhlová rychlost a f je frekvence, v našem případě 50Hz. Po dosazení dostaneme:

$$\sqrt{(2\pi \cdot f \cdot L)^2 + R^2} = \sqrt{(2\pi \cdot 50 \cdot 1,492)^2 + 34^2} = \sqrt{468,73^2 + 34^2} = 470\Omega$$

Efektivní hodnotu proudu vypočítáme jednoduše pomocí Ohmova zákona:

$$I_{ef} = U_{ef} / Z = 235 / 470 = 0,5\text{A}$$

Maximální hodnotu sinusového proudu vypočítáme jednoduše vynásobením druhou odmocninou ze dvou:

$$I_{max} = I_{ef} \cdot \sqrt{2} = 0,707\text{A}$$

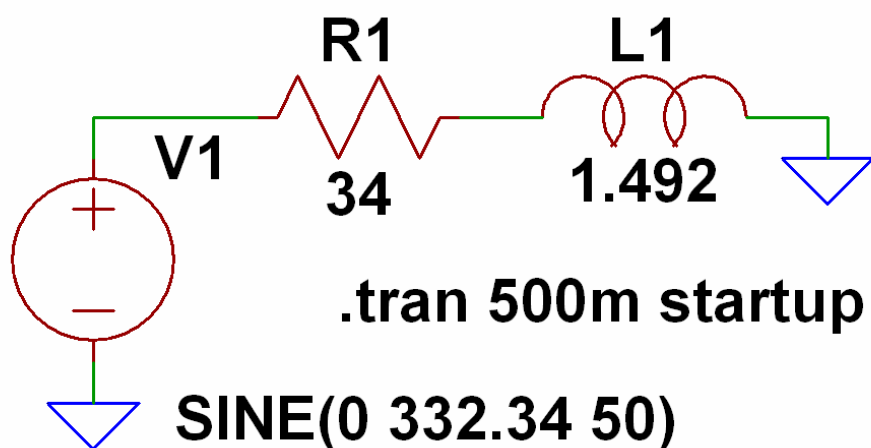
Nyní již můžeme přistoupit k simulaci. Protože do programu se zadává amplituda napětí zdroje, nikoli efektivní hodnota, musíme opět násobit odmocninou ze dvou:

$$U_{max} = U_{ef} \cdot \sqrt{2} = 332,34\text{V}$$

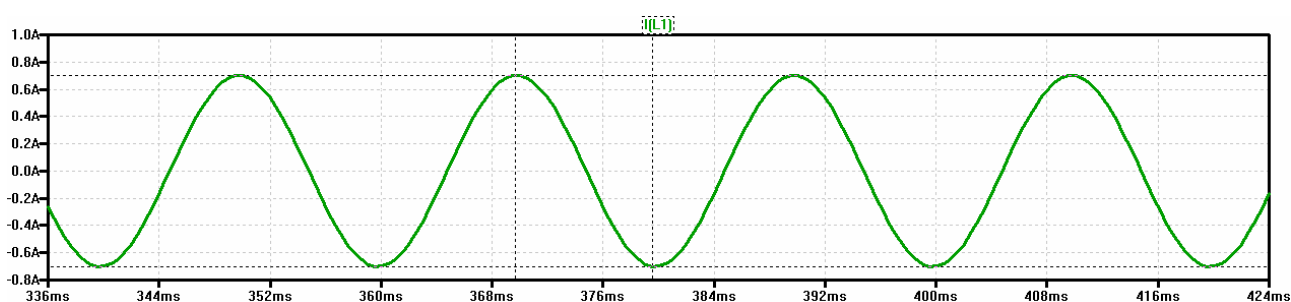
Na obr. 1 najdete simulační schéma. Na dalším obrázku je zobrazen průběh proudu motorem. A konečně na obr. 3 máme okno, v němž je udána kladná a záporná amplituda proudu. Hodnoty jsou téměř přesně 0,7A. Nepřesnost je:

$$(0,707 - 0,7) / 0,707 \cdot 100 = 1\%$$

což je celkem slušný výsledek.



Obr. 1



Obr. 2: Průběh proudu v obvodu na obr. 1



Obr. 3: Změřené amplitudy proudu

Nyní vypočítáme rezonanční kapacitu tak, aby k rezonanci došlo právě při frekvenci sítě 50Hz.

Pro rezonanci platí následující rovnice

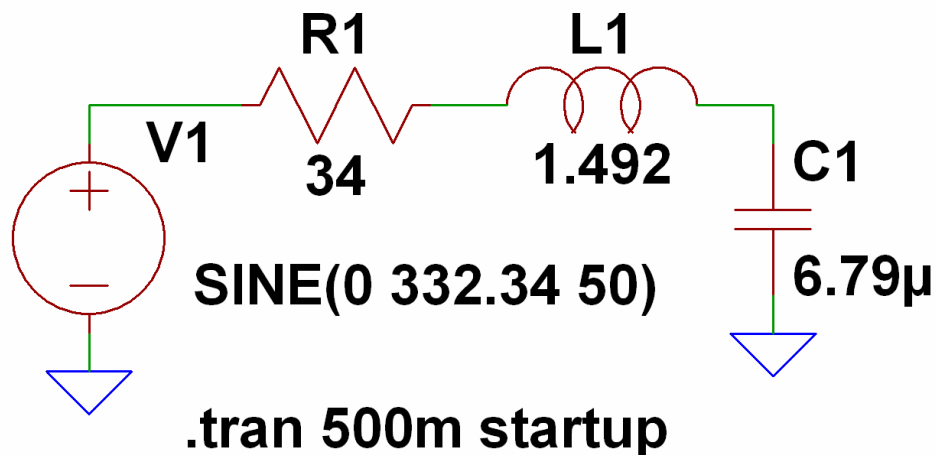
$$L.C = 1/ \omega^2$$

Odtud

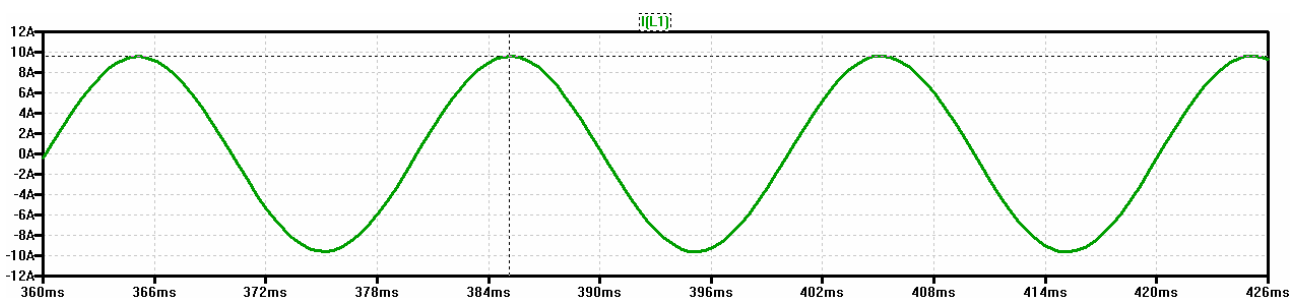
$$C = 1/ (\omega^2.L) = 1/ ((2.\pi.50)^2.1,492) = 6,79.10^{-6}F = 6,79\mu F$$

Obrázek 1 upravíme tak, že do série s cívku L1 přidáme kondenzátor C1 o hodnotě 6,79μF (viz obr. 4).

Když teď spustíme simulaci, amplituda proudu bude příliš velká, protože nám odpadla reaktance cívky. Vyzkoušejme to!



Obr. 4

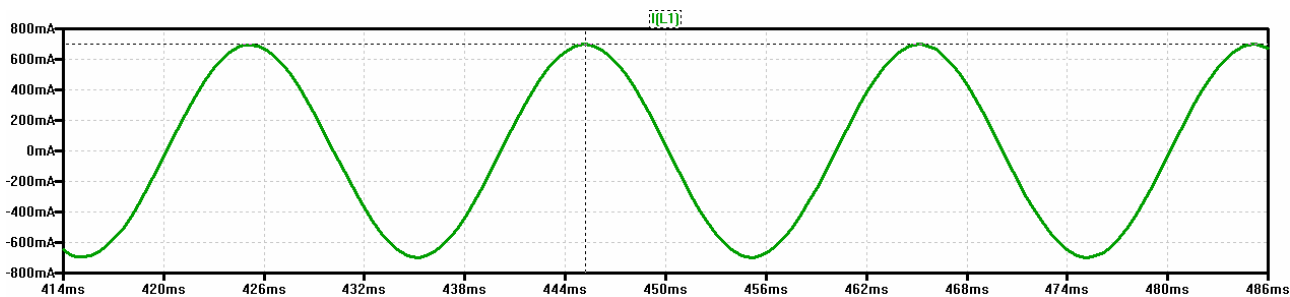


Obr. 5: Průběh proudu v rezonanci při plném napětí

Na obr. 5 vidíme, že amplituda proudu stoupla téměř na 10A. Naskytá se otázka: Jak velké napětí zdroje potřebujeme k tomu, aby motorem protékal jmenovitý proud 0,5A? Řešení je velmi jednoduché. Použijeme Ohmův zákon:

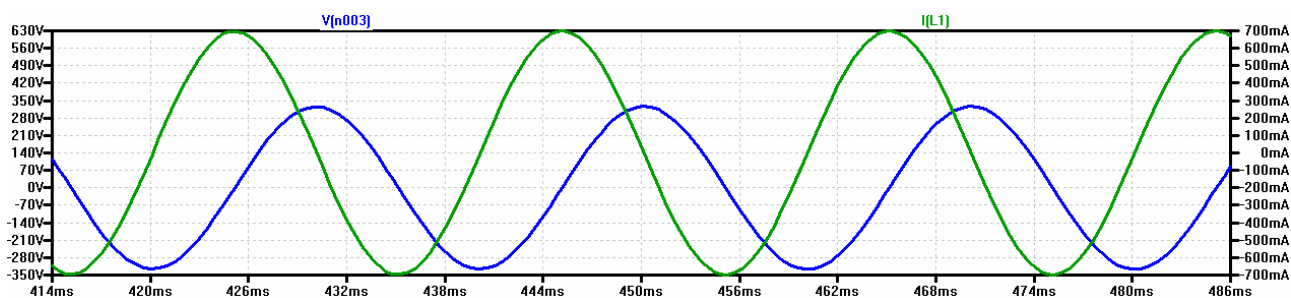
$$U_{\max} = I_{\max} \cdot R = 0,707 \cdot 34 = 24V$$

Jestliže amplitudu napětí snížíme na 24, bude amplituda proudu přibližně 0,7A, jak ukazuje obr. 6.



Obr. 6: Průběh proudu v rezonanci při sníženém napětí

Zjistil jsem, k mému překvapení, že někteří jedinci mají problém pochopit, že v rezonanci se mezi cívkou a kondenzátorem vyměňuje energie větší než je energie, která přichází ze zdroje. Nejdříve vypočítáme, jak velká je energie v cívce při amplitudě proudu a jak velká je energie v okamžiku, kdy je na kondenzátoru amplituda napětí. Potom si to názorně ukážeme pomocí simulace. Nejdříve se však podíváme na průběh proudu obvodem RLC a na napětí na kondenzátoru C1:



Obr. 7: Průběhy proudu a napětí v rezonanci

Zjistili jsme, že amplituda proudu je 697,163mA a amplituda napětí je 325,891V.

Energie cívky je dána vztahem

$$E_L = 1/2L.I^2$$

Po dosazení

$$E_L = 1/2.1,492.0,697163^2 = 0,362583 \text{ Joulu}$$

Energie kondenzátoru je dána vztahem

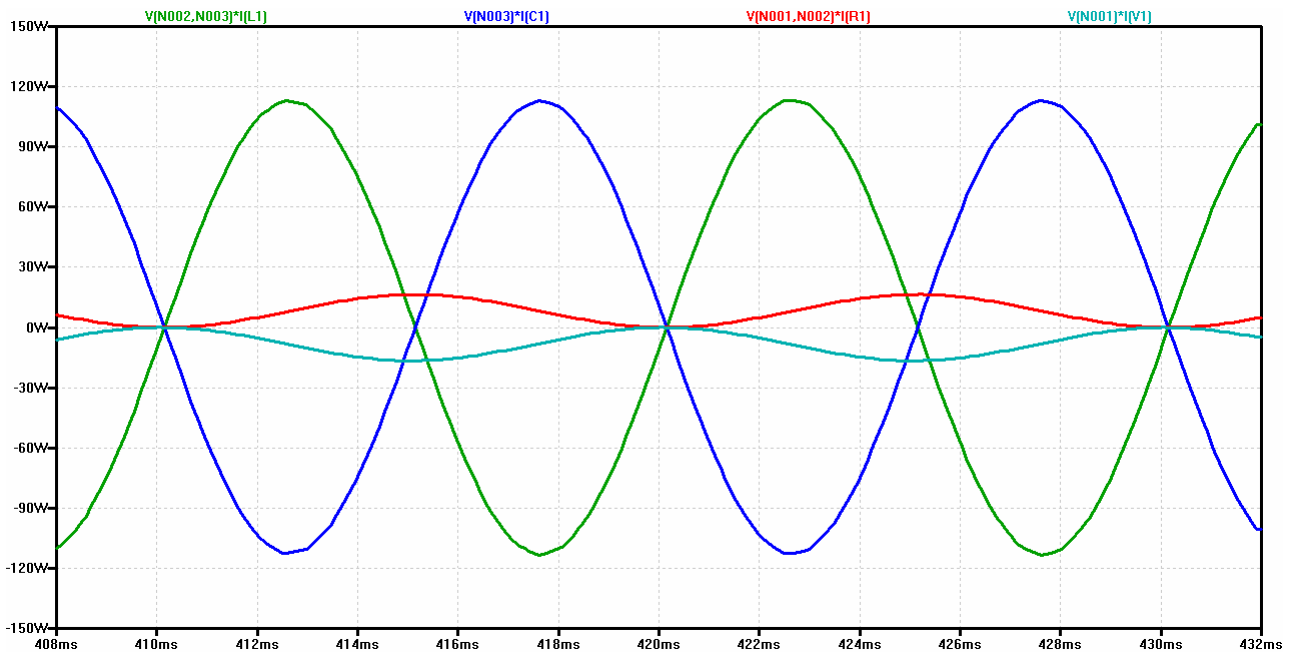
$$E_C = 1/2C.U^2$$

Po dosazení

$$E_C = 1/2.6,79.10^{-6}.325,891^2 = 0,360568 \text{ Joulu}$$

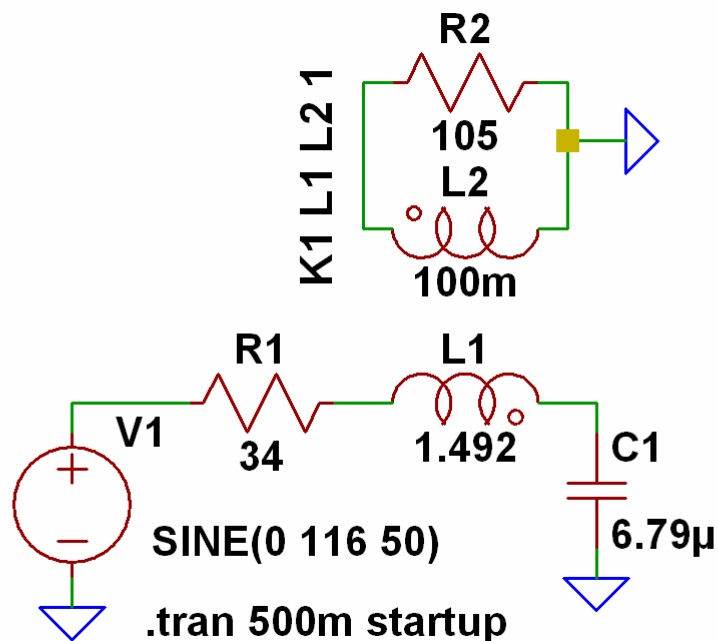
Porovnáme-li energie E_L a E_C , vidíme, že v obou případech je s malou tolerancí energie 0,36 Joulu.

Nyní se podíváme na grafické vyjádření. Program LTSpice je schopen vypočítat i výkon, tj. součin proudu a napětí v každém kroku simulace. Na obr. 8 vidíme, že amplitudy výkonů na cívce a kondenzátoru jsou stejné: zelená – výkon na cívce, modrá – výkon na kondenzátoru. Dále si můžete všimnout, že amplituda výkonu ztraceného na odporu R1 (červená) se rovná amplitudě výkonu odebíraného ze zdroje (modrozelená) s opačným znaménkem. Dále si všimněte, že výkon na odporu, resp. zdroje, je menší než výkony, jež se vyměňují mezi cívkou a kondenzátorem. Pro zajímavost ještě odečteme přesné hodnoty ze simulace: Amplituda výkonu na cívce je 112,837W a amplituda výkonu na odporu je 16,4441W. Když tyto dvě hodnoty dáme do poměru, zjistíme, že na cívce je výkon $112,837 / 16,4441 = 6,86$ -krát vyšší než na odporu, respektive výkon odebíraný ze zdroje. To je fajn, řekne si čtenář, jestliže budu mít účinnost motoru 50%, v rezonanci účinnost stoupne na $6,86 \times 50 = 343\%$. Tak jednoduše to bohužel nefunguje. Je zde velký nepřítel rezonance – vířivé proudy. Ty vznikají v elektricky vodivém magnetickém jádře. V článku [Návrh rezonančního řízení jednofázového motoru](#) jsme popsali metodu, jak velikost ztrát vířivými proudy zjistit. Zde použijeme pouze výsledek. Kdo se chce dozvědět podrobnosti, toho odkazují na zmíněný článek.



Obr. 8: Výkonové poměry v rezonančním obvodu podle obr. 4

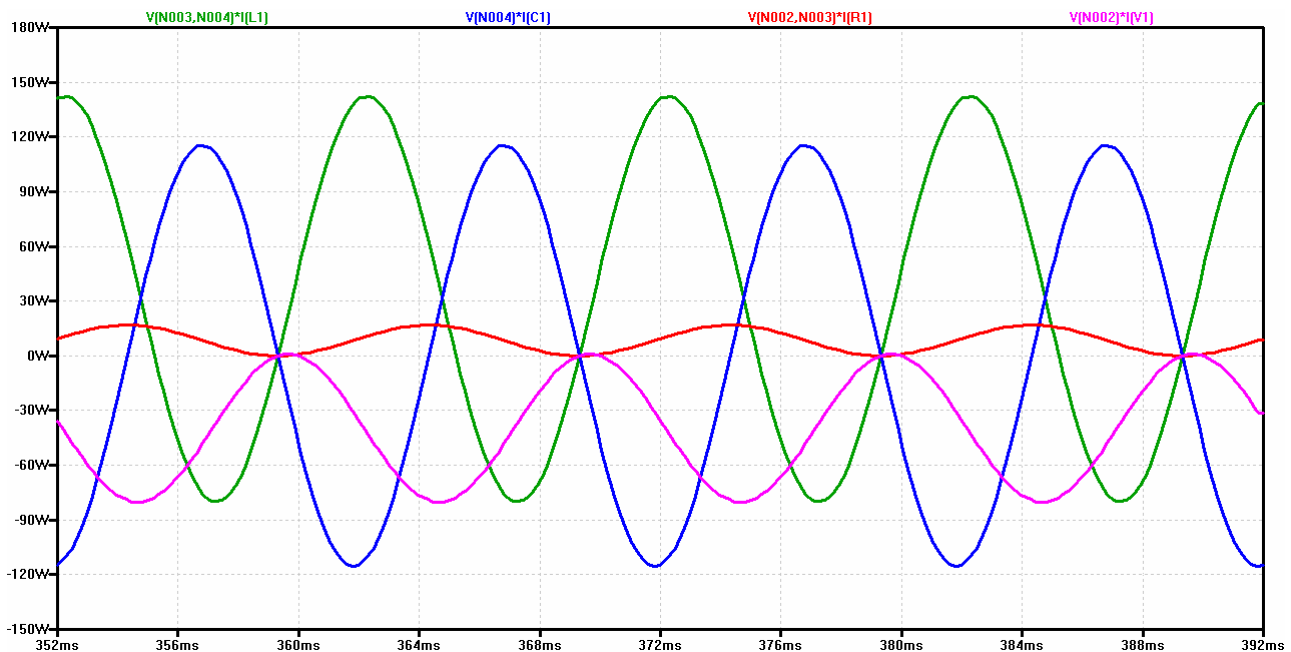
Obvod na obr. 4 upravíme tak, že budeme brát v úvahu vířivé proudy:



Obr. 9: Rezonanční obvod s cívkou se železným jádrem

Na obr. 9 vidíme, že přibyla cívka L2 a odpor R2. Dále si můžete všimnout, že amplitudu napětí zdroje jsme z 24V museli zvýšit na 116V, abychom dostali stejně velkou amplitudu proudu. Když nyní provedeme výkonovou analýzu, zjistíme značný pokles účinnosti. Na obr. 10 máme výsledek simulace. Jistě jste zaznamenali, že průběhy už nevypadají tak pěkně. Výkon na cívce (zelená čára) už není symetrický kolem nuly. Podívejme se na velikosti amplitud výkonů na L a C. Střední amplituda výkonu na cívce je $(142 + 80) / 2 = 111\text{W}$. Výkon na kondenzátoru je symetrický a jeho hodnota je cca 115W. Dostali jsme se tedy mírně mimo rezonanci. Dále si všimněme, že velikost

výkonu ztraceného na R1 se již nerovná výkonu odebranému ze zdroje, ale výkon odebraný ze zdroje je vyšší. Část výkonu zdroje se totiž spotřebovala na vířivé proudy.



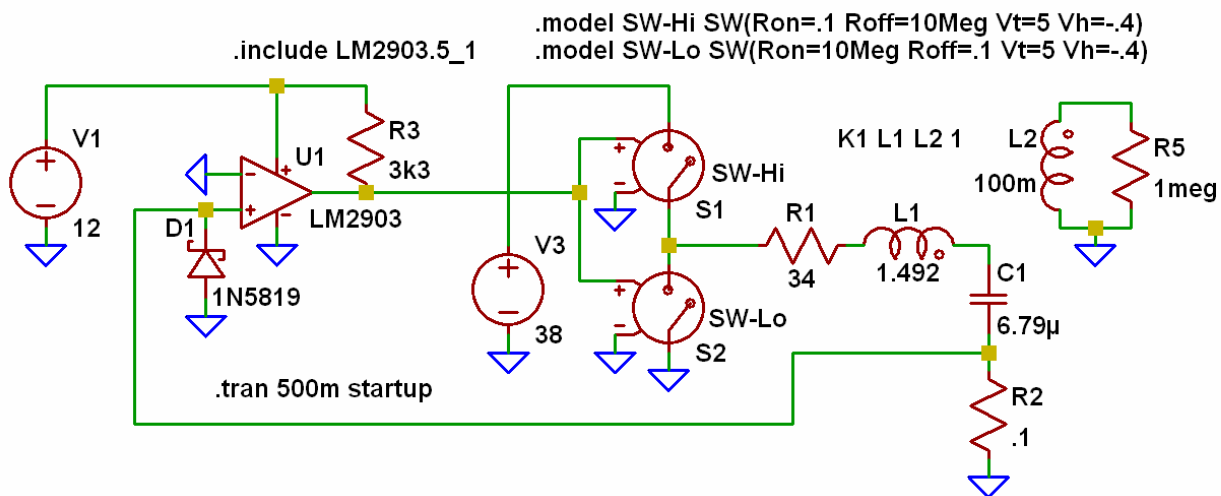
Obr. 10: Výkonové poměry v rezonančním obvodu s cívkou s železným jádrem

Když porovnáme výkon zdroje s výkonem na cívce, zjistíme, že tento poměr značně poklesl. Odečetli jsme amplitudu výkonu zdroje: 80,3W, takže dostaneme poměr výkonů $111/80,3 = 1,382$. Když předpokládáme účinnost motoru 50% (U malých motorů je účinnost malá.), dostaneme se na teoretickou účinnost v rezonanci $1,382 \times 50 = 69,1\%$. To opravdu není mnoho. Poznamenejme, že se jedná o malý jednofázový motor, kde je točivého pole dosaženo pomocí závitů nakrátko kolem pomocných pólů. Tyto závity nakrátko k vířivým proudům přidávají další ztráty. U větších motorů, zejména trojfázových, by účinnost měla být znatelně lepší. Pro představu se podívejte na článek [Rezonanční řízení reálného elektromotoru](#), kde je provedeno měření trojfázového motoru o výkonu 1,5kW.

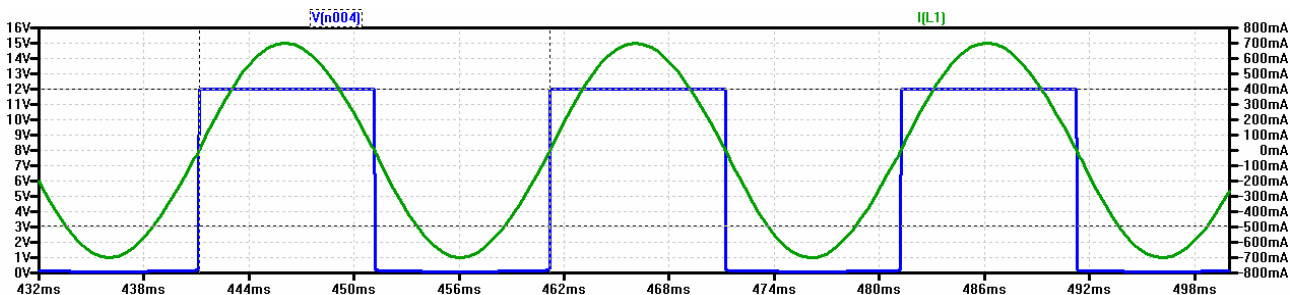
Nyní vezmeme zapojení rezonačního oscilátoru na obr. 6 v článku [Rezonanční motor – zdroj energie budoucnosti II](#) a dosadíme do něho parametry reálného motoru, nejdříve bez vířivých proudů, později s modelováním vířivých proudů. Zdroj pro napájení RLC obvodu je nyní stejnosměrný (V3) a pomocí přepínače vytváříme obdélníkový průběh. Nastavili jsme hodnotu napětí (38V) tak, aby amplituda proudu byla 700mA. Na obr. 11 máme schéma zapojení oscilátoru s naším motorem. Vířivé proudy modelujeme pomocí odporu R5, který je nyní nastaven na hodnotu $1M\Omega$, takže vířivé proudy jsou prakticky nulové. Na obr. 12 máme průběh řídicího napětí pro přepínač (S1, S2) a průběh proudu skrze cívku L1. Změřili jsme frekvenci, která je téměř přesně 50Hz. Křivky průběhů výkonů na jednotlivých prvcích oscilátoru máme na obr. 14. Vidíme, že amplituda výkonu na C1 mírně kolísá, zatímco na cívce je amplituda téměř stabilní. Výkon odebraný ze zdroje má vždy každou druhou půlplnu vynechanou a zdá se, že střední hodnota výkonu odpovídá výkonu ztracenému na odporu R1. Nyní opět vypočítáme poměr mezi výkonem na cívce a ztrátami na odporu: $115W/16,4W = 7$. (V předchozím případě se sinusovým zdrojem jsme zjistili hodnotu 6,86.)

Nyní u R5 změním hodnotu odporu na 105Ω a podíváme se nejdříve na rezonanční frekvenci a potom na výkony. Při napětí zdroje $V3 = 192V$ dostaneme téměř přesně amplitudu proudu 0,707A. Rezonanční frekvence nám stoupla asi o 0,5Hz (viz obr. 16). Na obr. 15 máme průběh proudu

cívkou a napětí na výstupu komparátoru. Zde se již projevuje vliv vyšších harmonických, protože nám klesl činitel jakosti Q , takže sinusovka je mírně zkreslená.



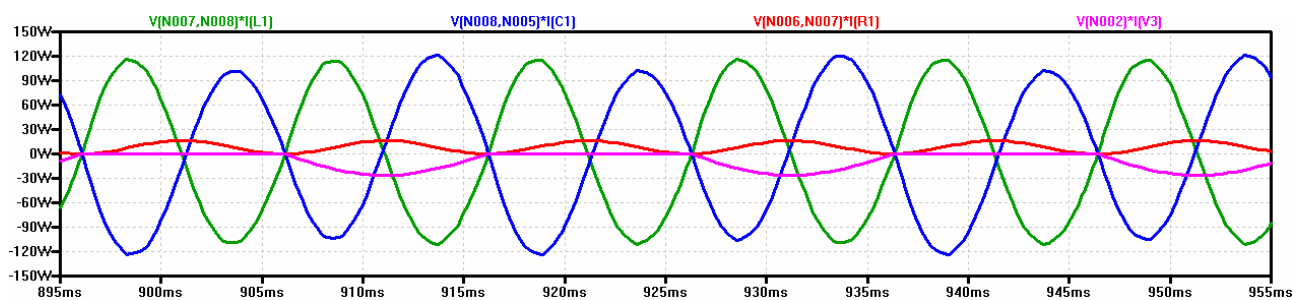
Obr. 11: Oscilátor s motorem s reálnými parametry bez vlivných proudů



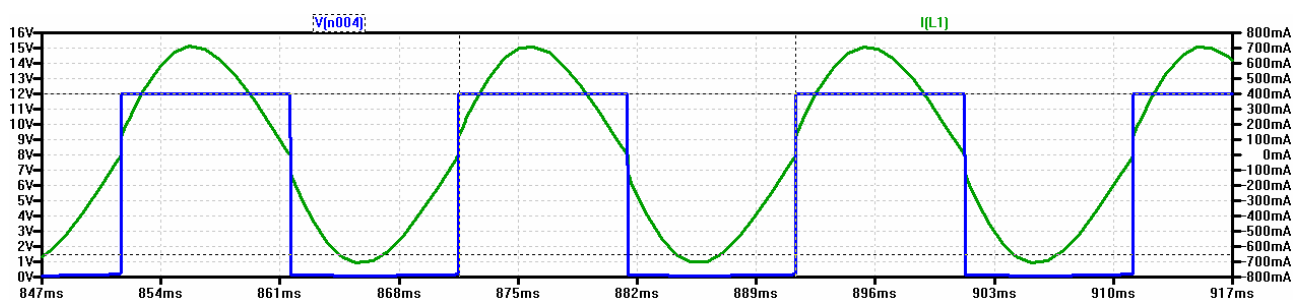
Obr. 12: Průběh napětí na výstupu komparátoru (modrá) a proudu cívkou (zelená)



Obr. 13: Změřená hodnota frekvence



Obr. 14: Výkonové poměry v oscilátoru podle obr. 11 – bez vířivých proudů



Obr. 15

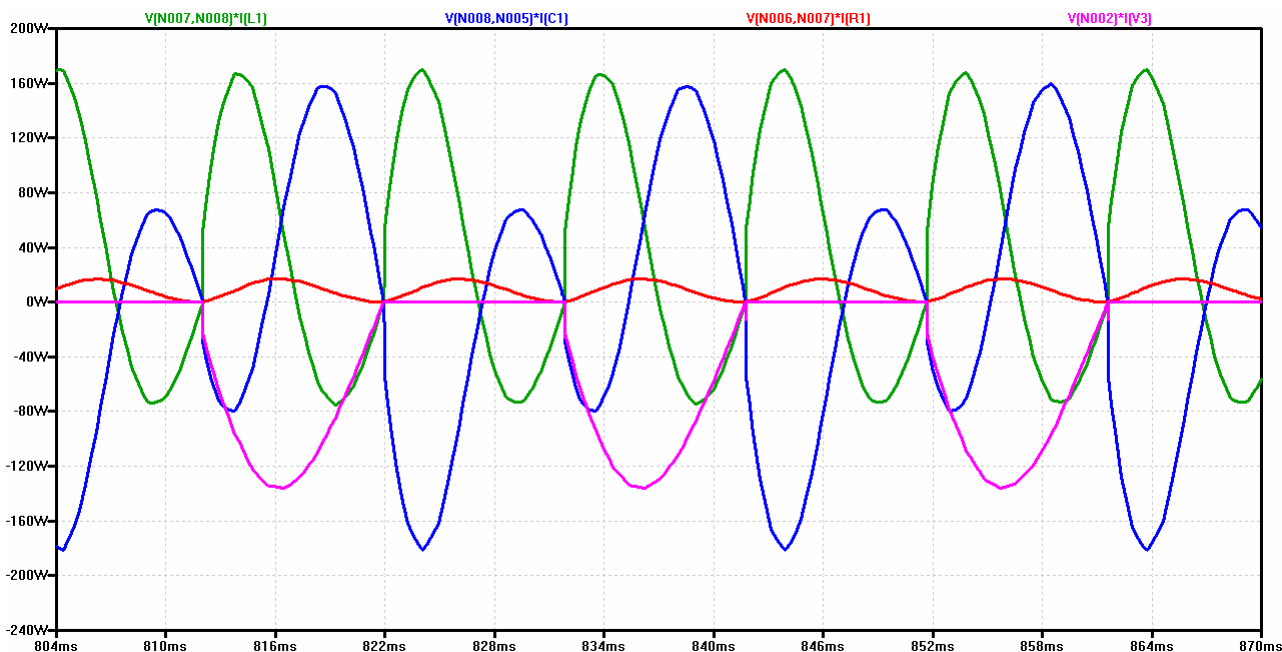


Obr. 16: Změřená hodnota frekvence

Opět se podíváme na výkony v obvodu oscilátoru. Protože křivka výkonu dodaného zdrojem má každou druhou půlvlnu vynechanou, musíme amplitudu dělit dvěma. Poměr výkonů tedy bude:

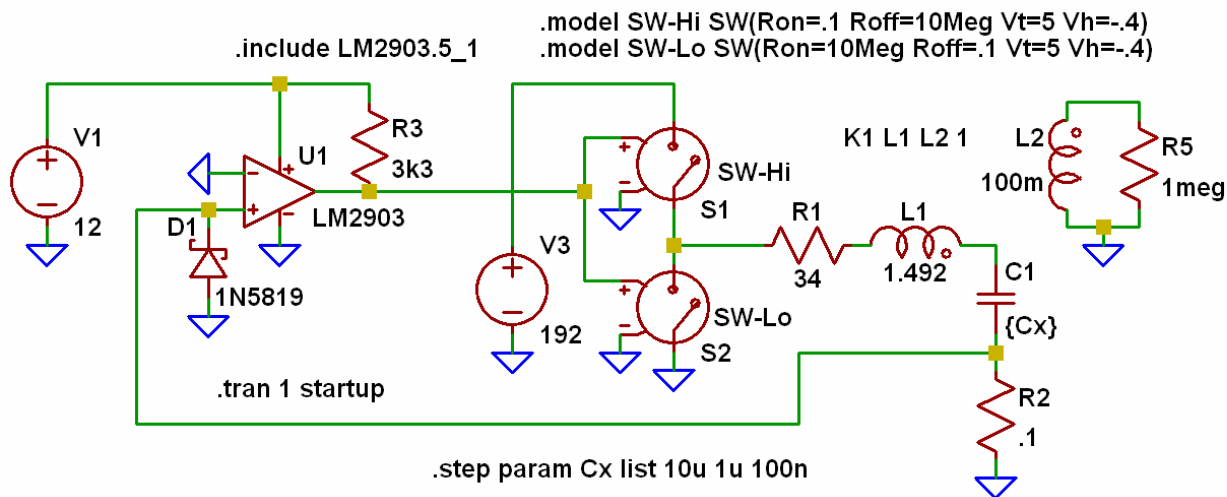
$$(170 + 73) / 136 = 1,787$$

To není zase tak špatný výsledek v porovnání se sinusovým zdrojem, kde jsme dosáhli poměru pouze 1,382.



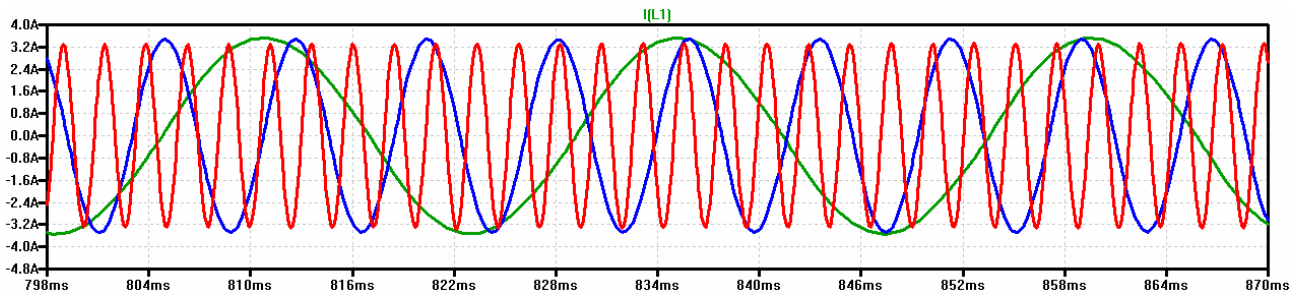
Obr. 17: Výkonové poměry v oscilátoru podle obr. 11 – s železem

Výhod rezonančního řízení využijeme nejlépe, pokud se dokážeme zbavit vířivých proudů, jak už bylo mnohokrát zdůrazněno. Nyní si ukážeme na příkladu motoru bez vlivu vířivých proudů výhody rezonančního řízení proti prostému napájení střídavým proudem. Vezmeme náš oscilátor s ideálním (tj. bez vířivých proudů) jednofázovým motorem a budeme měnit hodnotu kapacity rezonančního kondenzátoru C1:



Obr. 18: Řízení otáček rezonančního motoru změnou C1

Za C1 program dosazuje postupně tyto hodnoty 10uF, 1uF a 100nF. Jak můžete vidět na následujícím obrázku, amplituda proudu se s frekvencí téměř nemění. Důsledkem je to, že s frekvencí roste i výkon motoru, zatímco příkon je stále stejný, jak bylo ukázáno v předchozím článku. Pro srovnání nasimulujeme, jak bude záviset amplituda proudu na frekvenci u běžného motoru napájeného střídavým napětím o jmenovité hodnotě (230V_{ef}). Pro tento účel nejdříve změříme frekvence pro jednotlivé hodnoty kapacity C1 a zapíšeme do tabulky.

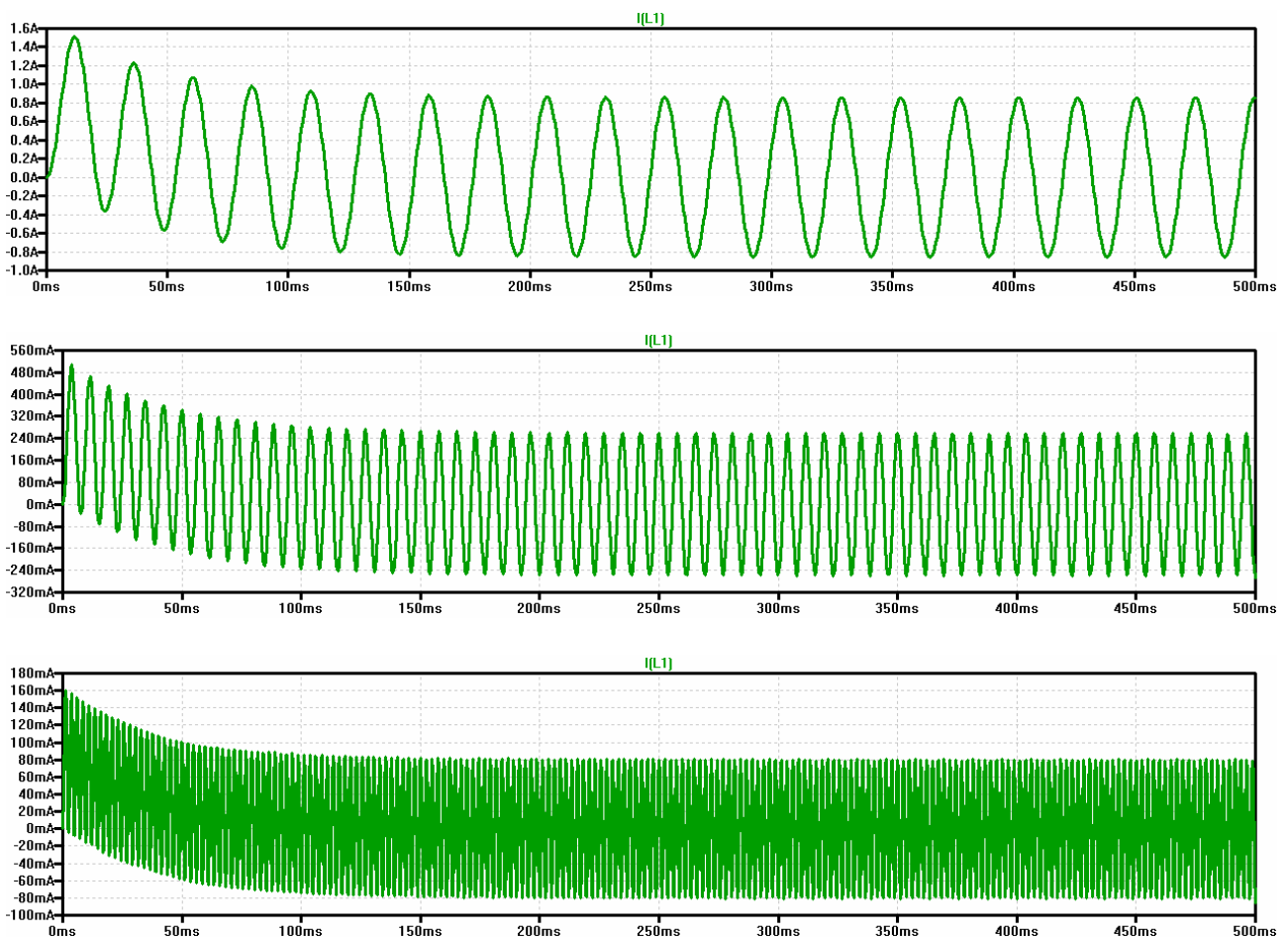


Obr. 19: Simulace vlivu frekvence na amplitudu proudu u rezonančního motoru

Kapacita C1 [uF]	10	1	0,1
Frekvence [Hz]	41	130	410

Tabulka 1: Závislost frekvence na kapacitě C1

Použijeme schéma zapojení z obr. 1 a budeme postupně měnit frekvenci. Bohužel se to nedá udělat jedním příkazem, proto budou následovat 3 obrázky s průběhy proudu pro frekvence z tabulky 1.



Obr. 20: Průběhy proudu v závislosti na frekvenci u běžného motoru

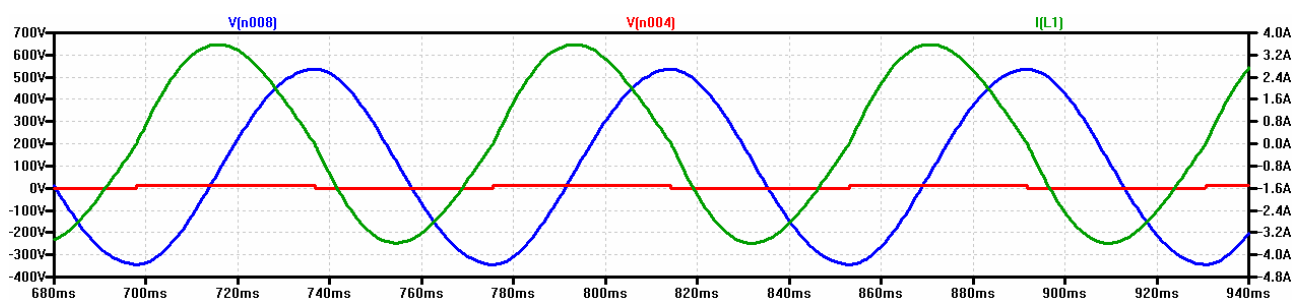
Na závislost amplitudy proudu na frekvenci u běžně napájeného motoru střídavým síťovým napětím (230V AC) se můžete podívat v následující tabulce:

Frekvence [Hz]	41	130	410
Amplituda proudu [mA]	855	255	80

Tabulka 2: Závislost proudu na frekvenci u běžného motoru

V tabulce 2 vidíte, že amplituda proudu s rostoucí frekvencí velmi silně klesá.

Nakonec ještě provedeme simulaci oscilátoru bez vlivu vířivých proudů pro kapacitu $C1 = 100\mu\text{F}$, kde bude zobrazen proud cívkou, napětí na $C1$ a řídicí napětí pro elektronický prepínač ($S1, S2$). Zvolili jsme úmyslně velkou kapacitu, aby napětí na výstupu komparátoru bylo vůbec zobrazitelné, protože při nižších kapacitách bylo napětí na $C1$ příliš vysoké, takže se napětí na výstupu $U1$ zobrazovalo jako přímka.



Obr. 21: Zelená – proud, modrá – napětí na $C1$, červená – řídicí napětí

Závěr

Chtěl jsem tento článek pojmout co nejsrozumitelněji co nejširšímu okruhu čtenářů, ale přesto pochopení látky vyžaduje určité duševní úsilí. Kdo je nechce nebo není schopen vyvinout, nemůže čekat, že všemu dobře porozumí. Srozumitelněji to už opravdu podat neumím. Ti chápavější snad už pochopili, že rezonanční motor je skutečně zdroj energie budoucnosti, bohužel nikoli současnosti. Ještě je třeba, aby proběhla změna paradigmatu a věda se vrátila k éteru z počátku 20. století. Potom už si nebude nikdo klepat na čelo, až uslyší o tom, že nějaký stroj má účinnost vyšší než 100%. Já nenabízím stroj, který má účinnost přes 100%, ale nabízím metodu, jak toho za určitých pomínek dosáhnout. Nejdříve však technici musí pochopit, že je principiálně možné, pomocí rezonance, vyrobit stroj s účinností nad 100%, a přizpůsobí tomu konstrukce svých elektromotorů. Pro rezonanční řízení nejsou příliš vhodné indukční motory s kotvou nakrátko, protože s rostoucím skluzem klesá činitel jakosti Q a tím i účinnost. Výhodnější je použít synchronní motor s magnety v rotoru. Indukování napětí ve statoru vlivem rotace magnetů příliš nevadí (neboť napětí vzniklé rezonancí je mnohonásobně vyšší než napětí zdroje). Dále je pro rezonanční řízení možné použít stejnosměrný motor s elektronickou komutací, známý pod zkratkou BLDC. Zde však musíme použít trochu jiný způsob řízení. O vlivu vířivých proudů na rezonanci jsem psal již mnohokrát. Bude nutné vyvinout nové materiály, které zajistí elektrickou nevodivost magnetického materiálu. Může se jednat třeba o ferity, práškové železo, různé železné piliny slisované s tmely a podobně. V některých konstrukcích motorů se používají vzduchové cívkové. To by také mohla být cesta. Dále je možné do série s vinutím motoru zařadit tlumivku, čímž bude možné snížit kapacitu rezonančního kondenzátoru. Zkrátka možností je spousta. Chce to jen, aby se rozvojem rezonančního řízení zabývalo co nejvíce lidí, kteří přijdou s dalšími nápady a řešeními.