

# REZONANČNÍ MOTOR pro managery

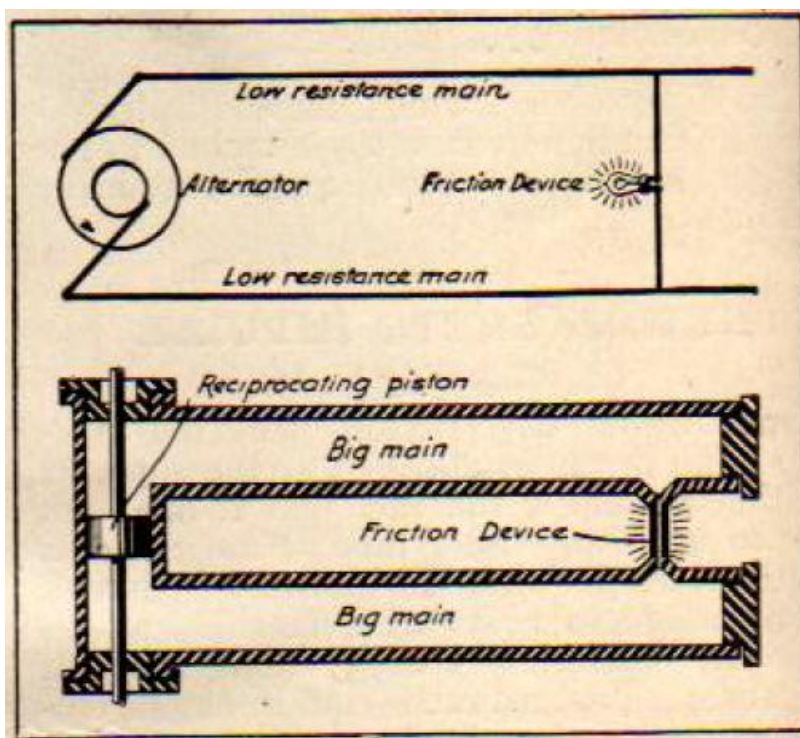
(c) Ing. Ladislav Kopecký, prosinec 2015

Tento článek je určen nejen pro managery, ale i pro další čtenáře, u nichž se nepředpokládá elektrotechnické vzdělání, jako jsou např. strojní inženýři nebo ženy v domácnosti, sekretářky apod.. Na druhé straně je naopak určen také elektrotechnikům, kteří jsou přesvědčeni, že elektřina nemá již žádná tajemství a že vše již bylo vynalezeno a objeveno. Mojí snahou je tedy psát tak, aby následující text pochopil co nejširší okruh čtenářů.

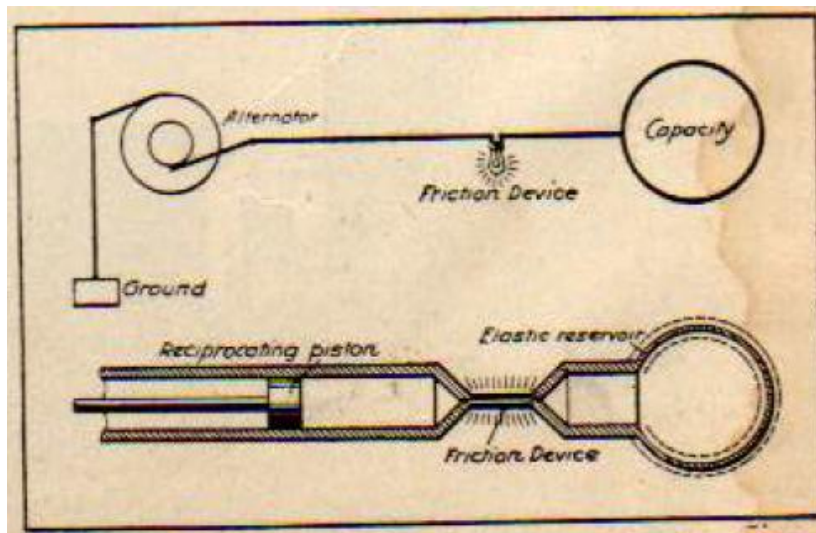
Protože mým záměrem je, aby článek pochopili i čtenáři bez elektrotechnického vzdělání, nejdříve uvedeme analogie mezi elektřinou a jinými médii. Začneme nejjednodušší analogií střídavého generátoru a spotřebiče v podobě žárovky. Přitom se budeme odvolávat na geniálního vynálezce dr. Nikolu Teslu, díky němuž máme náš současný systém střídavého proudu. Ve svém článku "The True Wireless", který byl otištěn v časopise *Electrical Experimenter* v květnu 1919, Tesla píše:

"Napájení zařízení po jednom drátu bez návratového bylo zpočátku záhadné z důvodu jeho novosti, ale může být snadno vysvětleno pomocí vhodné analogie. Pro tento účel byly nakresleny obrázky 1 a 2.

Na prvním z nich jsou elektrické vodiče představovány trubkami o velkém průřezu, alternátor oscilujícím pístem a vlákno žárovky úzkým kanálkem, který spojuje trubky. Z pohledu na schéma je zřejmé, že velmi malý pohyb pístu způsobí, že kapalina bude velkou rychlostí protékat kanálkem a že prakticky všechna pohybová energie bude přeměněna v teplo pomocí tření, podobně jako bude působit elektrický proud na vlákno žárovky.



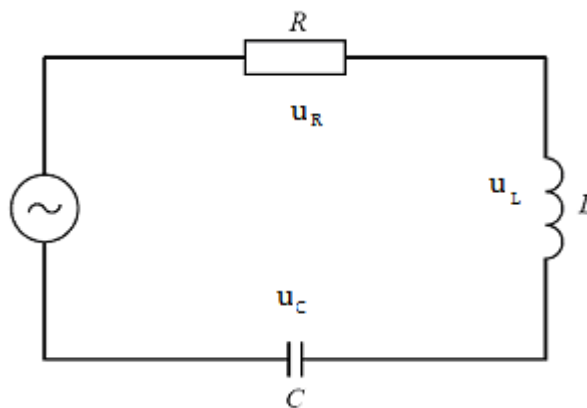
Obr. 1. Elektrický přenos po dvou drátech a hydraulická analogie.



Obr. 2. Elektrický přenos pomocí jednoho drátu a hydraulická analogie.“

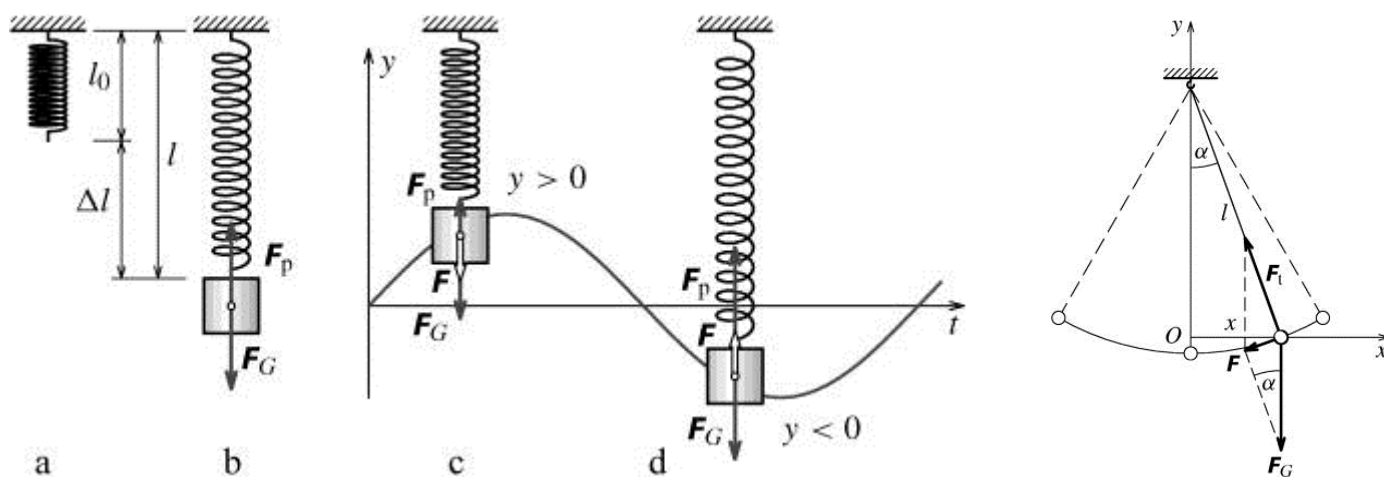
Všimněte si, že na obr. 2 je kondenzátor zpodobněn jako nafukovací balónek. Čím větší bude mít objem, tím větší tlak v něm bude. Čím větší náboj bude obsahovat kondenzátor, tím vyšší napětí bude na jeho vývodech.

Na obr. 3 máme elektrický oscilační obvod s elektrickým odporem  $R$ , cívkou  $L$  a kondenzátorem  $C$ . Tento obvod je připojen ke zdroji střídavého napětí. Pokud se kmitočet tohoto zdroje bude shodovat s kmitočtem přirozených kmitů oscilačního RLC obvodu, obvod bude v rezonanci a na cívce a kondenzátoru budou napětí vyšší než je napětí zdroje. Jak je to možné, si řekneme později.



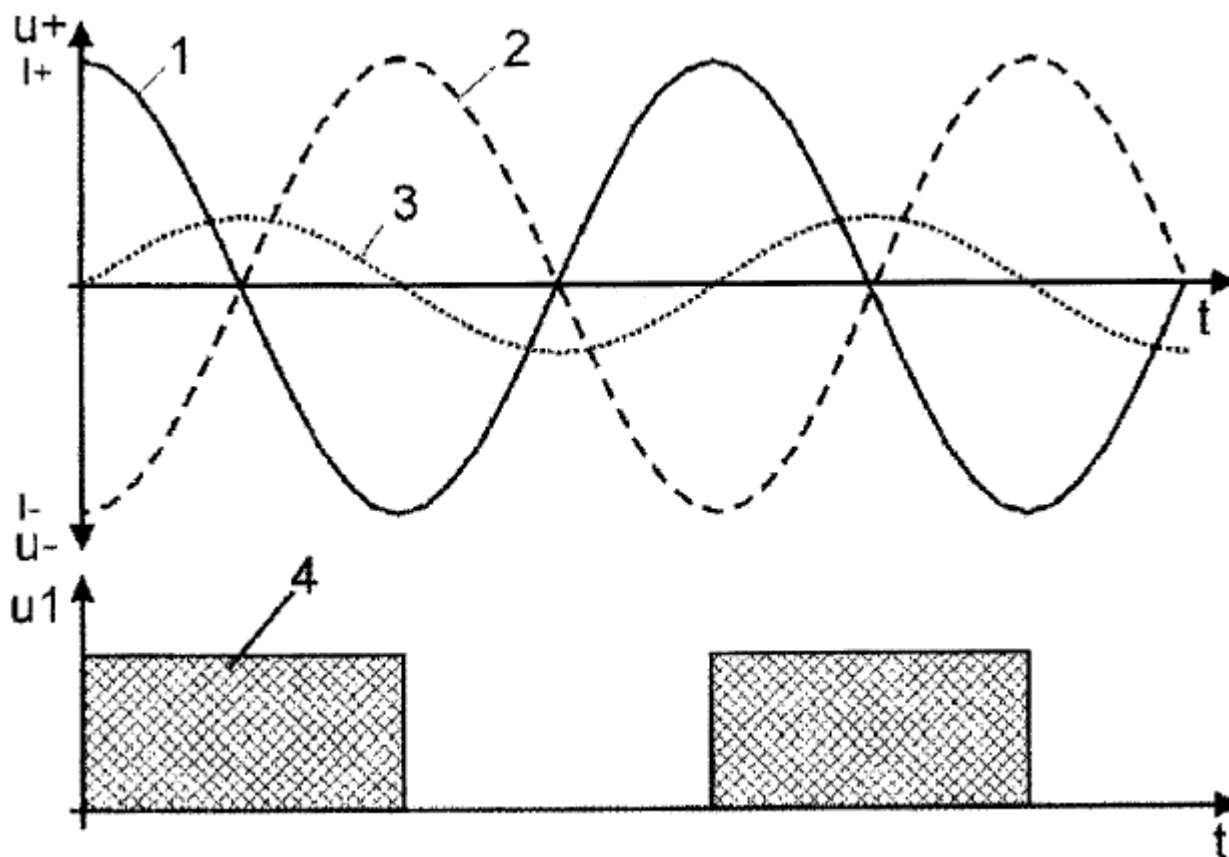
Obr. 3: Elektrický oscilační obvod

Mechanickou analogií elektrického oscilačního obvodu může být například závaží zavěšené na pružině nebo kyvadlo, jak ukazuje obr. 4. Pokud závaží zavěšenému na pružině nebo na tyči v případě kyvadla budeme dodávat silové impulzy v rytmu jejich přirozených oscilací, tato závaží budou kmitat netlumenými kmity, přičemž my budeme dodávat pouze energii ke krytí mechanických ztrát jako je tření a odpor prostředí. V elektrickém ekvivalentu na obr. 3 jsou tyto ztráty představovány odporem  $R$ . V obou případech, jak u elektrického obvodu, tak i u jeho mechanických ekvivalentů mají kmity harmonický průběh ve tvaru sinusovky, jak ukazuje obrázek závaží vlevo na obr. 4.



Obr. 4: Mechanické analogie elektrického rezonančního obvodu

Nyní se vrátíme k elektrickému obvodu na obr. 3 a podíváme se na průběhy napětí a proudu. V patentovém spisu č. 296 623 mého vynálezu s názvem “Zapojení pro rezonanční řízení jedofázového motoru” je obrázek, kde jsou zobrazeny průběhy jednotlivých veličin rezonančního RLC obvodu.



Obr. 5: Průběhy obvodových veličin rezonančního obvodu

Plná čára (1) představuje napětí na cívce, čárkovaná čára (2) napětí na kondenzátoru a tečkovaná čára (3) znázorňuje proud protékající RLC obvodem. Všimněte si, že křivky 1 a 2 mají opačné průběhy – jsou vzájemně

posunuty o  $180^\circ$  - takže z hlediska zdroje se jejich účinky vzájemně ruší. To znamená, že RLC obvodem teče proud, který je dán Ohmovým zákonem

$$I = U/R \quad (1)$$

kde  $I$  je proud,  $U$  je napětí zdroje a  $R$  je elektrický odpor.

Můžete si položit otázku, jak velký by obvodem na obr. 3 tekla proud, kdyby tam byla pouze cívka bez kondenzátoru. V tom případě by obvodem tekla proud daný následujícím vztahem:

$$I = U/Z \quad (2)$$

kde  $Z$  je impedance daná vzorcem

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (3)$$

kde  $\omega$  je úhlový kmitočet, pro který platí

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

kde  $\pi = 3,141592654$  je Ludolfovo číslo a  $f$  je frekvence neboli kmitočet.

Provedeme-li opět srovnání s mechanickými analogickými obvody, je to podobné, jako kdybychom z obr. 4 odstranili pružinu nebo tyč kyvadla a závažím manipulovali ručně. I laikovi musí být zřejmé, že bychom se v tomto případě více nadřeli. Můžeme tedy učinit závěr, že elektrická rezonance šetří energii, přičemž úspora energie bude záviset na velikosti odporu  $R$ . Čím  $R$  bude menší, tím větší úspory energie dosáhneme.

Nyní se podíváme na to, jak velký kmitočet zdroje je třeba k tomu, aby byl RLC obvod v rezonanci. Vraťme se zpátky k obr. 3, kde máme nakreslený obvod se sériově zapojenými prvky  $R$ ,  $L$ ,  $C$  a zdrojem napětí  $U$ . Vlivem napětí zdroje protéká obvodem elektrický proud. Na každém z těchto prvků dojde k vytvoření určitého napětí. Kdybychom použili analogii s hydraulickým obvodem na obr. 1, můžete si představit, že ty úzké kanálky máme tři a na každém z nich dojde k jistému poklesu tlaku. Celkový pokles tlaku se musí rovnat tlaku na začátku potrubí. Tlak v potrubí v hydraulickém systému je analogií k napětí v elektrickém obvodu a průtok je analogií k elektrickému proudu. Tato analogie není přesná, protože cívka a kondenzátor způsobují fázový posun napětí vůči proudu. Pro hrubou představu však tato analogie stačí. Odpor kladený střídavému proudu cívkou a kondenzátorem nazýváme reaktancí. Induktivní reaktanci značíme  $X_L$  a platí

$$X_L = j\omega L \quad (5)$$

Kapacitní reaktanci značíme  $X_C$  a platí

$$X_C = 1 / j\omega C = -j / \omega C \quad (6)$$

Písmeno  $j$  ( $j$  jako jalový) značí fázový posun o  $90^\circ$ .

Poznámka: Ve vyšší matematice existují komplexní čísla, která mají reálnou a imaginární část. Imaginární část čísla je označena písmenem  $i$ , kterému se říká imaginární jednotka. Reálná čísla jsou zobrazena na vodorovné ose, zatímco imaginární čísla na ose svislé. Pro imaginární jednotku platí následující jednoduché vztahy:

$$i^2 = -1, i^3 = -i, i^4 = 1$$

Tolik na vysvětlenou, proč ve vztahu (6) je v čitateli u  $j$  znaménko mínus, zatímco ve jmenovateli plus. Komu to přesto není jasné, měl by si zopakovat základy početních operací se zlomky. Tím se zde nebudeme zdržovat.

Nyní můžeme již sestavit rovnici popisující obvod na obr. 3:

$$U = I.R + I.X_L + I.X_C \quad (7)$$

kde  $I$  je efektivní hodnota proudu protékajícího obvodem.

Po dosazení podle (5) a (6) dostaneme následující tvar rovnice (7)

$$U = I.R + I.j(\omega L - 1/\omega C) \quad (8)$$

Rovnice

$$\omega L - 1/\omega C = 0 \quad (9)$$

je podmínkou rezonance a v tom případě se nám rovnice zjednoduší na obyčejný Ohmův zákon:

$$U = I.R \quad (10)$$

Když v (9) dosadíme za  $\omega$  podle (4), potom po několika matematických operacích dostaneme známý Thompsonův vzorec pro rezonanční frekvenci:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (11)$$

Na začátku jsem psal, že v rezonanci je napětí na kondenzátoru a cívce vyšší než je napětí zdroje. Jak velké toto napětí ale bude? To nyní zjistíme poměrně snadno a je to také hlavní důvod předcházejícího výkladu. Když se vrátíme k rovnicím (7) a (8), zjistíme, že v rezonanci je napětí na cívce dáno součinem proudu  $I$  a induktivní reaktance  $X_L$ .

$$U_L = I.X_L = I.j\omega L \quad (12)$$

Stejným postupem zjistíme, že napětí na kondenzátoru v rezonanci bude

$$U_C = I.X_C = -I.j/\omega C \quad (13)$$

Co nám tyto dva poslední vztahy říkají? Říkají nám to, že napětí v rezonanci bude tím vyšší, čím větší poteče obvodem proud  $I$ , čím vyšší bude úhlový kmitočet  $\omega$ , čím bude větší indukčnost  $L$  a čím bude menší kapacita  $C$ . Při daném napětí  $U$  bude podle (1) velikost proudu  $I$  záviset na činném odporu  $R$ . Chceme-li tedy, aby napětí na  $L$  a  $C$  bylo co největší, budeme se snažit, aby odpor  $R$  v obvodu na obr. 3 byl co nejmenší. Jaký to má fyzikální význam? Abychom si odpověděli na tuto otázku, uvažujme, že máme elektrický motor, jehož elektrické chování můžeme vyjádřit pomocí indukční cívky. Reálné motory jsou samozřejmě popisovány složitějšími modely, k těm se dostaneme později, ale v této chvíli pro jednoduchost budeme předpokládat, že

chování motoru lze popsat obyčejnou cívku. Cívka, jíž protéká elektrický proud, vytváří magnetické pole a má schopnost přitahovat předměty z feromagnetických materiálů, jako je železo, nikl nebo kobalt. Čím cívku poteče větší proud, tím bude přitažlivá síla větší. Když budeme mít vhodný mechanismus, který tuto přitažlivou sílu převede na rotační pohyb, a proud tekoucí cívku bude střídavý, dostaneme elektrický motor. Když cívka nebude přitahovat obecné železo, ale magnet, bude cívka tento magnet polovinu periody proudu přitahovat a další polovinu odpuzovat. Pohybem magnetu v okolí cívky se v ní sice bude indukvat napětí, ale to nyní zanedbáme a vrátíme se k tomu, až se budeme zabývat reálnými modely elektromotorů. Nyní si položíme otázku: Na čem závisí výkon  $P$  motoru? Odpověď nám poskytne následující jednoduchý vzorec:

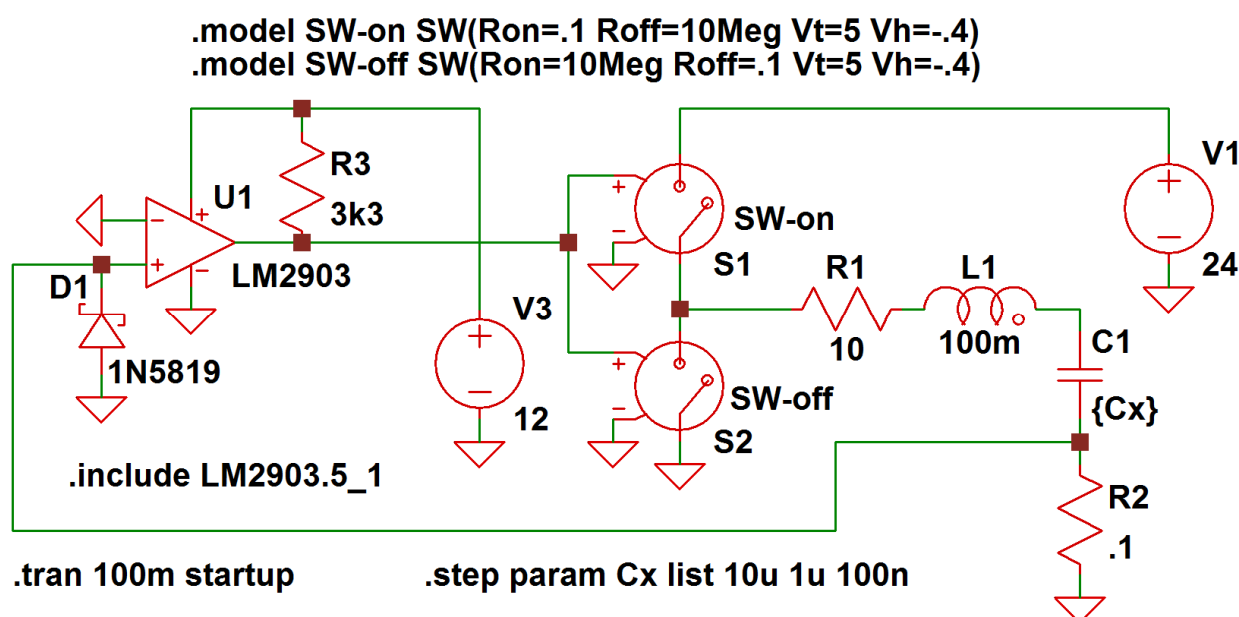
$$P = \omega \cdot M \quad (14)$$

kde  $\omega$  je úhlová rychlost daná vztahem (4) a  $M$  je krouticí moment daný

$$M = F \cdot r \quad (15)$$

kde  $F$  je síla a  $r$  je vzdálenost působíště síly od osy rotace.

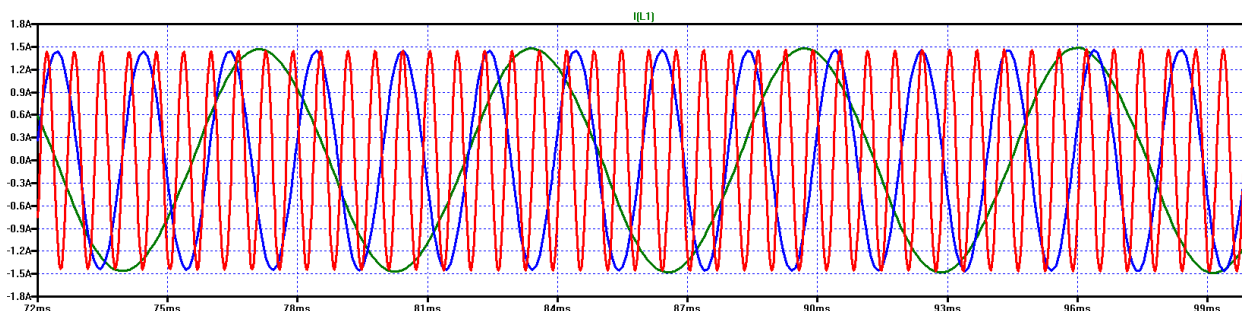
Nyní přichází na řadu můj vynález č. 296 623. Jedná se v podstatě o LC oscilátor, jehož cívku tvoří vinutí motoru. Ti z vás, kteří mají vzdělání v elektronice, vědí, že aby oscilátor kmital, musí mít kladnou zpětnou vazbu. Víme, že v rezonanci se RLC obvod chová jako činný odpor. To znamená, že napájecí napětí je ve fázi s proudem. Jinými slovy, mezi proudem a napětím není žádný fázový posun. To znamená, že pro udržení oscilací stačí, když zpětnou vazbu odvodíme od proudu procházejícího RLC obvodem. Nejjednodušší způsob, jak získat proudový signál, je pomocí sériového odporu a malé hodnotě, na němž vznikne malý úbytek napětí. Tento naěťový signál je vyhodnocen napěťovým komparátorem, který řídí elektronický přepínač. Tento přepínač přepíná svůj výstup střídavě na kladný a záporný pól napájecího zdroje. Na výsledné schéma zapojení se můžete podívat na obr. 6.



Obr. 6: Schéma zapojení oscilátoru z patentu č. 296 623

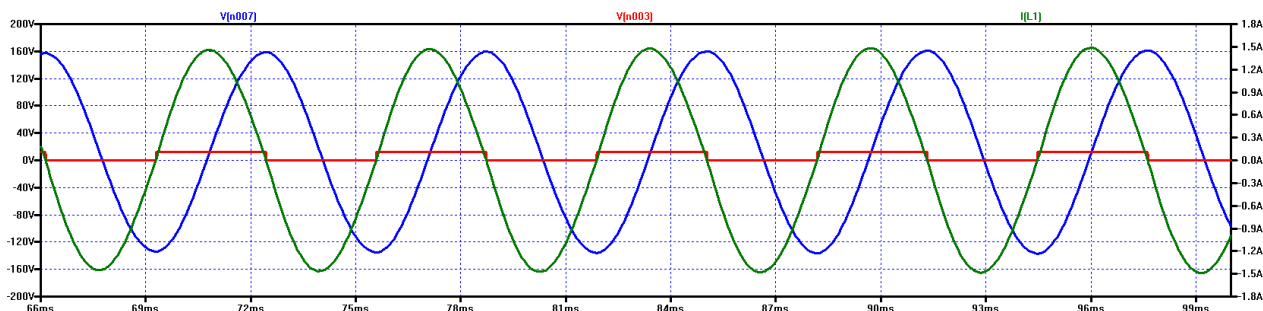
Schéma zapojení na obr. 6 bylo nakresleno pomocí programu LTspice, což je program určený pro simulaci elektronických obvodů, takže se budeme moci podívat, jak tento oscilátor funguje. Nejdříve si však stručně popíšeme jednotlivé prvky schématu. Prvky  $R1$  a  $L1$  představují činný odpor a indukčnost cívky. Jak už bylo

řečeno, tou cívkou může být statorové vinutí motoru. Dále zde máme rezonanční kondenzátor C1. Do série s tímto RLC obvodem je zapojen snímací odpor R2. Úbytek napětí na R2 je přiveden na jeden ze vstupů komparátoru U1. Když je na odporu R2 kladné napětí, je na výstupu komparátoru napětí zdroje V3 (v tomto případě 12V). Toto napětí způsobí otevření spínače SW-on. Když je na odporu R2 napětí záporné, je na výstupu U2 nulové napětí a je sepnut spínač SW-off. Program LTSpice umožňuje automaticky zadávat různé hodnoty zvoleného prvku a sledovat, jak se mění parametry obvodu. Tuto možnost jsme využili k tomu, abychom sledovali, jak se bude měnit průběh proudu RLC obvodem v závislosti na kapacitě rezonančního kondenzátoru C1. Na výsledek se můžete podívat na obr. 7, kde můžete vidět, že snižováním kapacity se zvyšuje frekvence, ale amplituda proudu zůstává stejná. Jaké to má praktické důsledky, si povíme později.



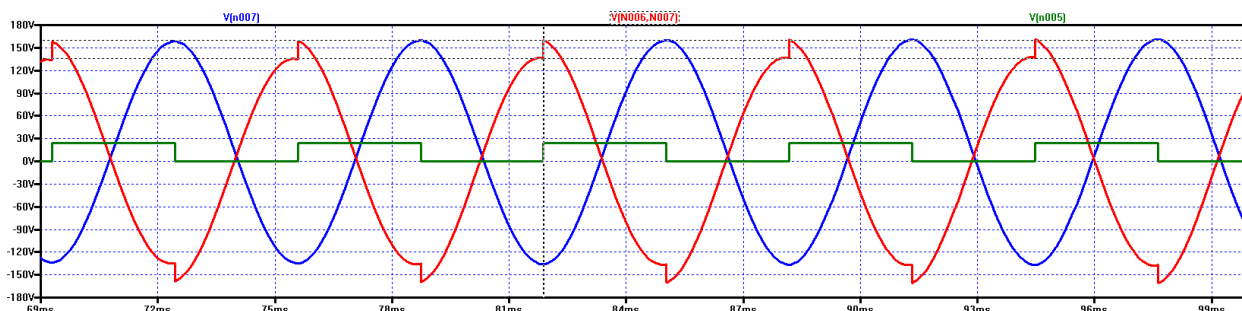
Obr. 7: Průběhy proudu RLC obvodem pro různé hodnoty C1

Nyní se podíváme na průběhy ostatních veličin v oscilátoru. Na obr. 8 můžete vidět průběh proudu (zelený), napětí na kondenzátoru C1 (modrý) a na výstupu komparátoru U1 (červený). Všimněte si, že napětí na komparátoru a proud jsou ve fázi. Mezi proudem a napětím na kondenzátoru je fázový posun  $90^\circ$ .



Obr. 8: Průběh proudu RLC obvodem, napětí na kondenzátoru a napětí na výstupu komparátoru

Na dalším obrázku máme průběhy napětí na kondenzátoru C1 (modrý), na cívce L1 (červený) a na výstupu přepínače SW-on, SW-off:

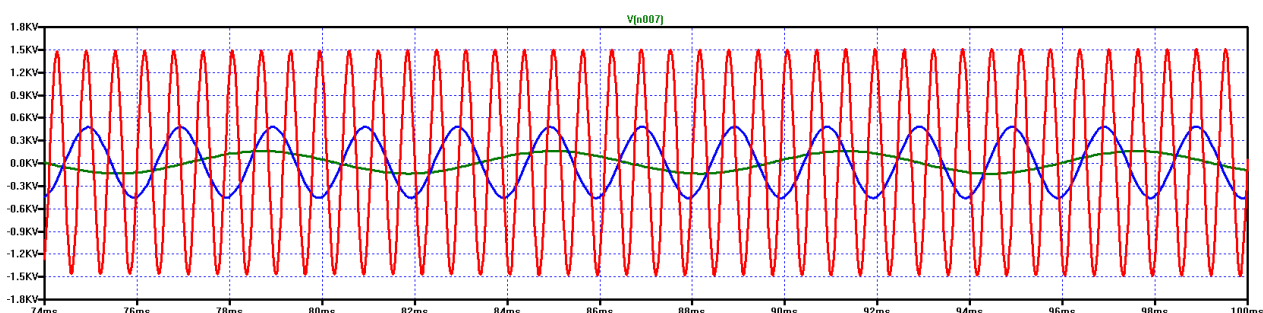


Obr. 9: Průběhy napětí na kondenzátoru C1, na cívce L1 a na výstupu přepínače



Na obr. 9 si všimněte, že napětí a proud jsou vzájemně posunuty o  $180^\circ$  a že na cívce jsou v místech kladné a záporné amplitudy napěťové skoky. Velikost těchto skoků se rovná hodnotě napájecího napětí zdroje V1 (v tomto případě 24V).

Nyní se vrátíme k obr. 7. Zde máme průběhy proudu RLC obvodem o různých kmitočtech. Dále vidíme, že amplituda proudu je pro všechny frekvence stejná. Co to znamená? Když cívka L1 bude představovat vinutí motoru, budou jeho otáčky, resp. úhlová rychlost  $\omega$ , odpovídat frekvenci  $f$  proudu a krouticí moment  $M$  bude odpovídat jeho amplitudě. To znamená, že s frekvencí poroste výkon motoru podle vztahu (14). Napájecí napětí V1 máme konstantní a odběr proudu také. To znamená, že příkon se nemění a roste pouze výkon, čímž se zvyšuje účinnost motoru. Teoreticky bychom tak mohli zvyšovat účinnost motoru neomezeně. V praxi však budeme narážet na fyzikální bariéry, o nichž si povíme, až se budeme bavit o reálných modelech elektromotorů. V této chvíli si povíme jen o jedné z nich, a to o napětí na statorové cívce motoru. S rostoucími otáčkami motoru poroste napětí na cívce podle vztahu (12). Pro konkrétní představu se můžete podívat na obr. 10, kde máme průběhy napětí na C1 pro různé hodnoty rezonanční kapacity:



Obr. 10: Průběhy napětí na rezonančním kondenzátoru v závislosti na jeho kapacitě

V tabulce 1 najdete hodnoty frekvence, napětí na C1 a otáček dvoupólového motoru pro různé kapacity rezonančního kondenzátoru C1.

| C1         | Frekvence [Hz] | Napětí na C1 [V] | Otáčky [1/min.] |
|------------|----------------|------------------|-----------------|
| 10 $\mu$ F | 159            | 161              | 9540            |
| 1 $\mu$ F  | 501            | 486              | 30060           |
| 100nF      | 1584           | 1508             | 95040           |

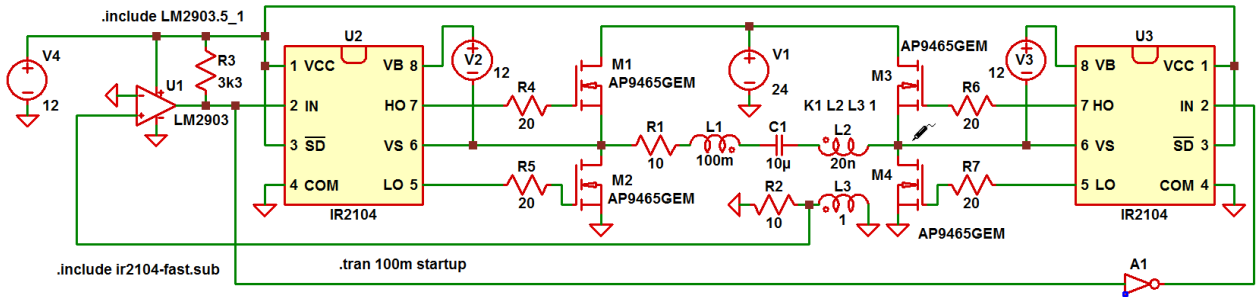
Tabulka 1: Závislost frekvence, napětí na C1 a otáček na kapacitě C1

Už víme, že v rezonanci je napětí na cívce stejně velké jako na kondenzátoru. To znamená, že kdybychom bez kondenzátoru chtěli dosáhnout stejného výkonu jako v rezonanci při napájecím napětí 24V DC, museli bychom mít střídavý zdroj (resp. frekvenční měnič), jenž by byl schopen vyrobit napětí a frekvence uvedené v tabulce 1. Ve skutečnosti by napětí zdroje muselo být ještě o něvo vyšší, protože musíme počítat i s činným odporem cívky.

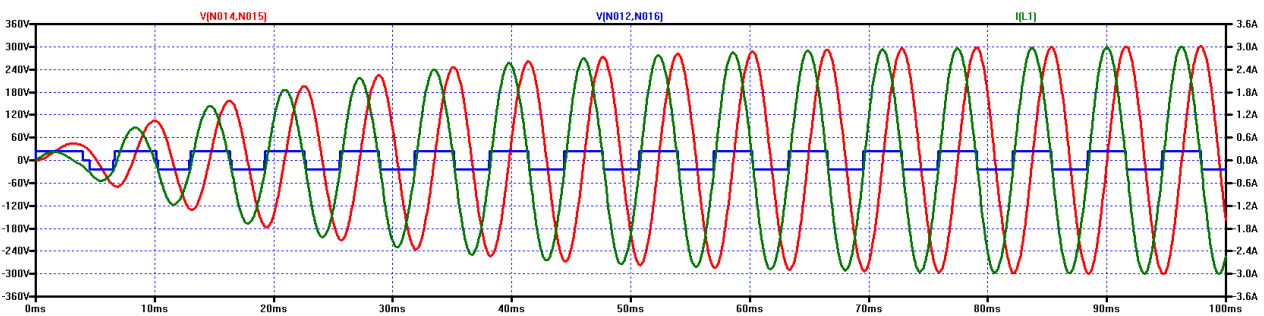
Oscilátor na obr. 6 je nejjednodušší možný. Další možností je použít čtyři spínače zapojené do H-můstku. V tomto případě jako snímač proudu již nemůžeme použít obyčejný odpor, ale například proudový transformátor. Na obr. 11 je schéma zapojení tohoto oscilátoru s reálnými spínači. Integrované obvody IR2104 jsou budiče tranzistorů MOSFET. Cívky L2, L3 představují proudový transformátor. Na obr. 12 máme průběhy proudu a napětí v oscilátoru na obr. 11: proud je zobrazen zeleně, napětí na kondenzátoru červeně a napětí mezi oběma dvojicemi přepínačů modře. Proud je oproti půlmůstkovému zapojení oscilátoru dvojnásobný (srovnej s obr. 8). Zdroje V2, V3 jsou DC-DC měniče, které zajišťují napětí pro horní spínací tranzistory M1, M3. Pro vyšší



frekvence lze tyto zdroje nahradit nábojovými pumpami s diodou a kondenzátorem. Bližší informace najdete v datasheetu obvodu IR2104.

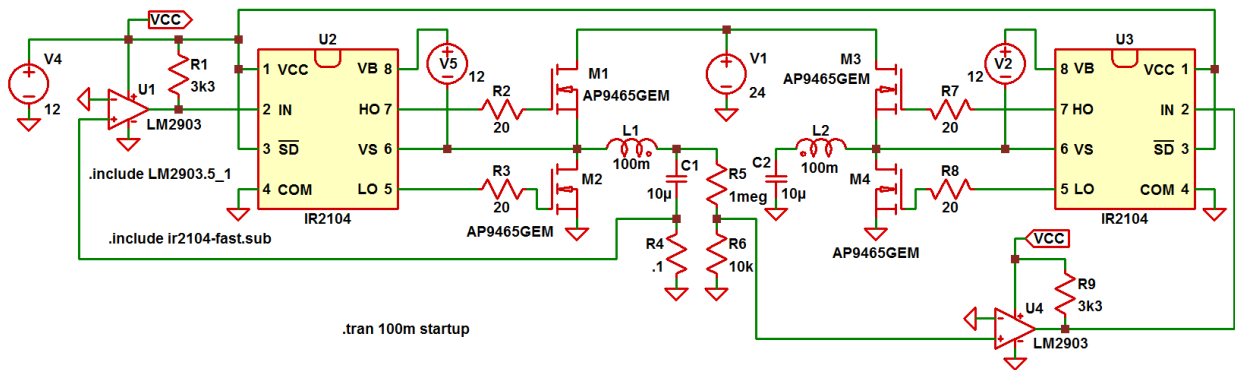


Obr. 11: Oscilátor s úplným H-můstkem

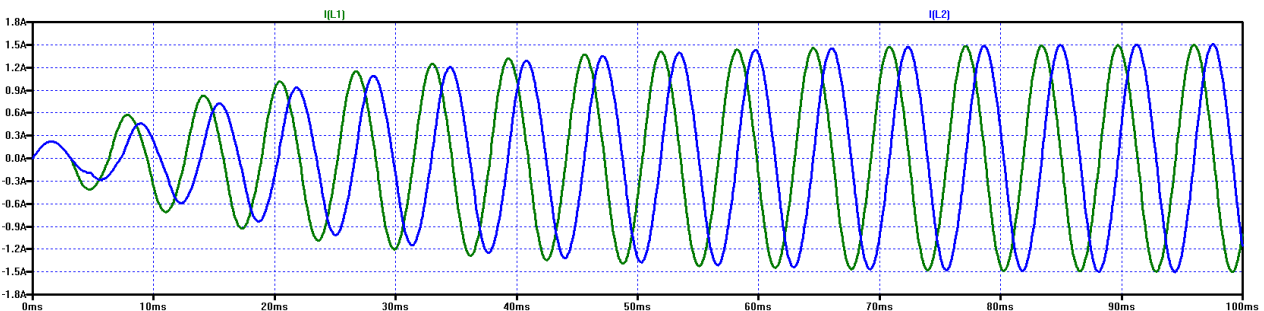


Obr. 12: Průběhy napětí a proudu v oscilátoru na obr. 11

Jednofázové motory se používají pouze pro malé výkony. Dále si ukážeme, jak lze rezonančně řídit motory s více fázemi. Nejjednodušším příkladem je rezonanční řízení dvoufázového motoru v půlmůstkovém zapojení, jehož schéma zapojení najdete na obr. 13.



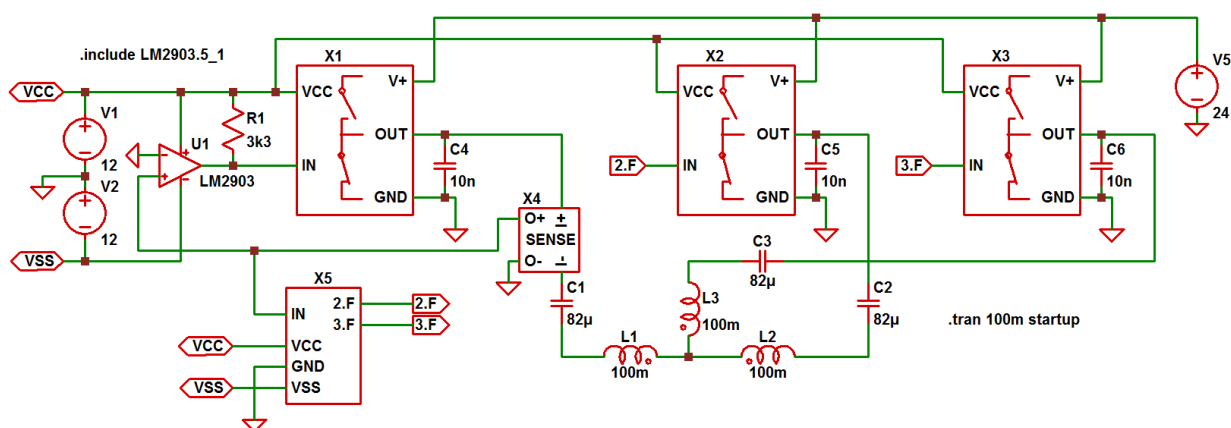
Obr. 13: Rezonanční řízení dvoufázového motoru



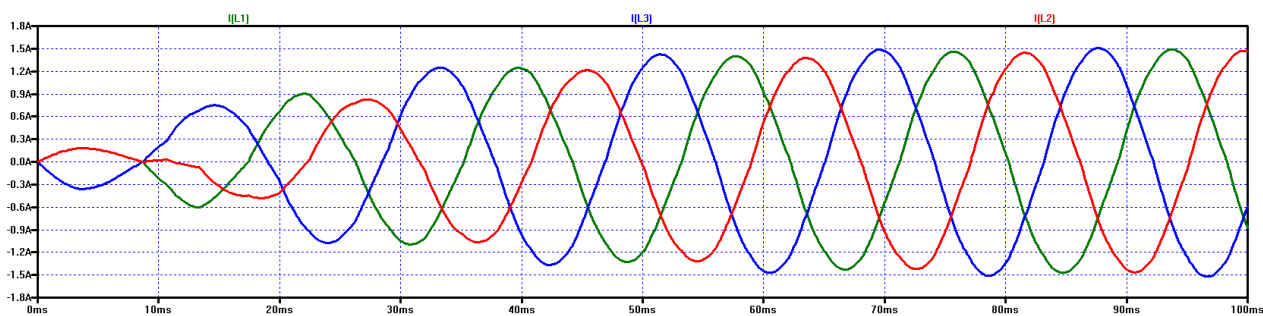
Obr. 14: Průběhy proudů fází v obvodu na obr. 13

U dvoufázového motoru je fázový posun mezi proudy fází  $90^\circ$  (viz obr. 14). Tento fázový posun je nutný, aby se vytvořilo točivé magnetické pole. V sériovém rezonančním obvodu je fázový posun mezi proudem a napětím na kondenzátoru rovněž  $90^\circ$ . Tohoto faktu využijeme pro řízení druhé fáze motoru. Rezonanční obvod L1, C1 je součástí oscilátoru v původní podobě jako na obr. 6, zatímco řízení L2, C2 je odvozeno od napětí na C1 a je upraveno na vhodnou úroveň pomocí napěťového děliče R5, R6. Komparátor U4 potom tento signál vyhodnocuje obvyklým způsobem a řídí druhou dvojici elektronických spínačů. Výhoda tohoto způsobu vytvoření fázového posunu spočívá nejen v jednoduchosti, ale také v tom, že je frekvenčně nezávislý.

Princip rezonančního řízení trojfázového motoru je podobný, avšak potřebujeme fázové posuny  $120^\circ$  a  $240^\circ$ . Poměrně jednoduše lze tyto fázové posuny realizovat pomocí kombinací RC členů a komparátorů. Tento způsob vytvoření fázových posunů je také poměrně jednoduchý. Jeho nevýhodou ale je, že je frekvenčně závislý. Pokud bychom chtěli vytvořit frekvenčně nezávislý posouvač fází, mohli bychom k tomu použít malý mikrokontrolér. Vytvoření příslušného programu by bylo poměrně jednoduché a spočívalo by v měření délky periody oscilátoru první fáze a v práci s časovači. Na obr. 15 máme příklad rezonančního řízení trojfázového motoru. Prvky L1, C1 jsou součástí oscilátoru, přičemž blok X4 je převodník proudu fáze na napěťový signál. Blok X5 je posouvač fází, jehož schéma zapojení najdete na obr. 17. Na obr. 16 jsou zobrazeny proudy fází motoru. Bloky X1 – X3 jsou elektronické přepínače, které by mohly být zapojeny stejně, jako například na obr. 11 nebo 13.



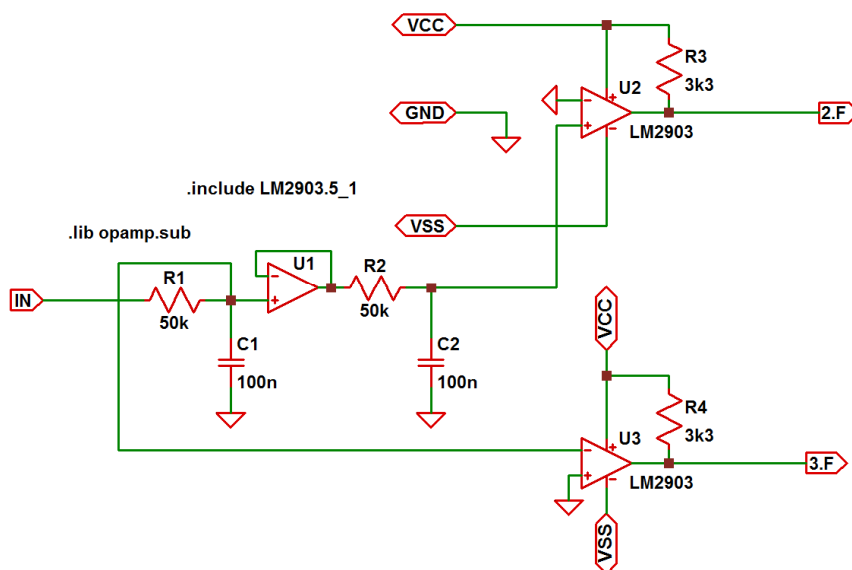
Obr. 15: Rezonanční řízení trojfázového motoru



Obr. 16: Proudů jednotlivých fází trojfázovém motoru při rez. řízení

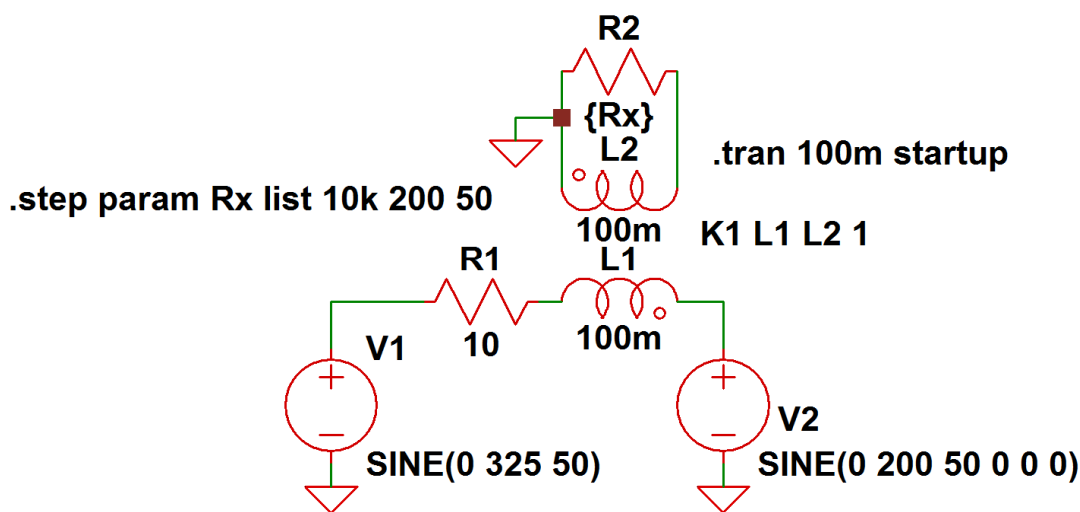
Posouvač fází na obr. 17 obsahuje dva RC členy (R1, C1 a R2, C2), jež jsou impedančně odděleny pomocí operačního zesilovače U1. Signály na výstupech RC členů jsou převedeny na obdélkový signál pomocí komparátorů U2 a U3. Pro úhel  $\varphi$  fázového posunu způsobeného RC členem platí vztah

$$\text{tg } \varphi = \omega RC \quad (16)$$



Obr. 17: Posouvač fází pro rezonanční řízení 3f motoru

Až dosud jsme předpokládali, že motory se chovají jako indukční cívka. Nyní se blíže podíváme na reálné modely elektromotorů.



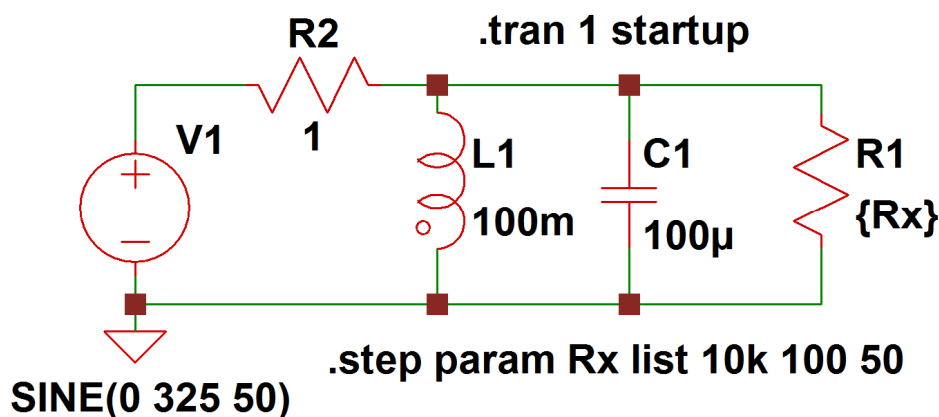
Obr. 18: Simulační model reálného motoru

Model popisující skutečné chování elektromotoru se skládá z činného odporu R1, který představuje odpor vinutí, dále z transformátoru, tvořeného cívkami L1, L2, jehož sekundární vinutí je zatíženo odporem R2, a střídavého zdroje V2. Tento model je obecný a platí pro všechny druhy střídavých motoru, přičemž jednotlivé prvky modelu se u různých typů motorů uplatňují v různé míře. Primární cívka L1 představuje indukčnost vinutí statoru, zatímco sekundární cívka L2 s odporem R2 představují ztráty vířivými proudy nebo také skluz (u indukčního motoru). Záleží pouze na velikosti odporu R2 a jestli se mění se zatížením. Ztráty vířivými proudy ve statoru se se zátěží (skluzem) příliš nemění, zatímco skluz je přímo určen velikostí R2 (čím větší skluz, tím menší odpor R2). Zdroj V2 představuje napětí indukované statorové cívkou vlivem rotace magnetického pole v rotoru. U synchronního motoru má toto indukované napětí frekvenci shodnou s frekvencí napájecího zdroje V1 a liší se úhlem vzájemného posunu. V ideálním případě bez zátěže je tento úhel  $0^\circ$  (při polaritě nakreslené na obr. 18) a indukované napětí působí proti napětí napájecímu, takže statorovým vinutím protéká nejmenší

proud. S rostoucí mechanickou zátěží motoru se úhel zvětšuje a roste proud. U indukčního motoru se frekvence indukovaného napětí s frekvencí napájecího zdroje neshoduje a jeho velikost a frekvence závisí na velikosti skluzu. Co nás na tomto modelu zajímá z hlediska rezonančního řízení? Zajímá nás především to, co a jak ovlivňuje činitel jakosti  $Q$ . Činitel jakosti určuje, kolikrát je napětí indukované v cínce v rezonanci vyšší než napájecí napětí ( $Q = U_L/U$ ) nebo je určen jako poměr induktivní reaktance a činného odporu ( $\omega L/R$ ). Přitom činný odpor rezonančního obvodu  $R$  nepředstavuje pouze odpor vinutí  $R_1$ , ale je dán proudem  $I$ , který protéká rezonančním obvodem podle Ohmova zákona:  $R = U/I$ . Jak tento proud ovlivňuje indukované napětí  $V_2$  a odpor  $R_2$ ?

Pro jednoduchost budeme předpokládat, že u synchronního motoru se neuplatňuje vliv  $R_2$  (není skluz a vířivé proudy jsou rovny nule, protože jsme použili buď vzduchové cívky, nebo feromagnetikum s nekonečně velkým odporem), zatímco u indukčního motoru zanedbáme vliv indukovaného napětí. V případě synchronního motoru se bude se zátěží proud v rezonanci zvyšovat, takže  $Q$  poroste. U asynchronního (indukčního) motoru s rostoucí zátěží bude vklesat hodnota  $R_2$  a v rezonanci bude klesat proud  $I$  tekoucí RLC obvodem, takže  $Q$  bude klesat. Který motor bude vhodnější pro rezonanční řízení se sériovým rezonančním obvodem? Bude to ten motor, jehož  $Q$  nebude s rostoucí mechanickou zátěží klesat. A to je synchronní motor. U asynchronního motoru motoru bude největší pokles  $Q$  při rozběhu, kdy je největší skluz, takže rezonančně řízený asynchronní motor může mít problémy s rozběhem. Tyto motory jsou však nejrozšířenější, proto se vyplatí tento problém řešit. Zdá se, že nejvhodnějším řešením je použít paralelní rezonanci. Paralelní rezonanční obvod má totiž tu vlastnost, že u něho - na rozdíl od sériového rezonančního obvodu - s klesajícím  $Q$  proud v LC obvodu neklesá, ale zůstává konstantní. Snížení  $Q$  se projeví zvýšením odběru proudu ze zdroje. Nyní se na paralelní rezonanční obvod podíváme blíže.

Na obr. 19 máme paralelní rezonanční obvod, kde odpor  $R_1$  představuje ztráty v rezonančním obvodu a malý odpor  $R_2$  nám poslouží k měření odběru proudu ze zdroje a představuje vnitřní odpor zdroje.

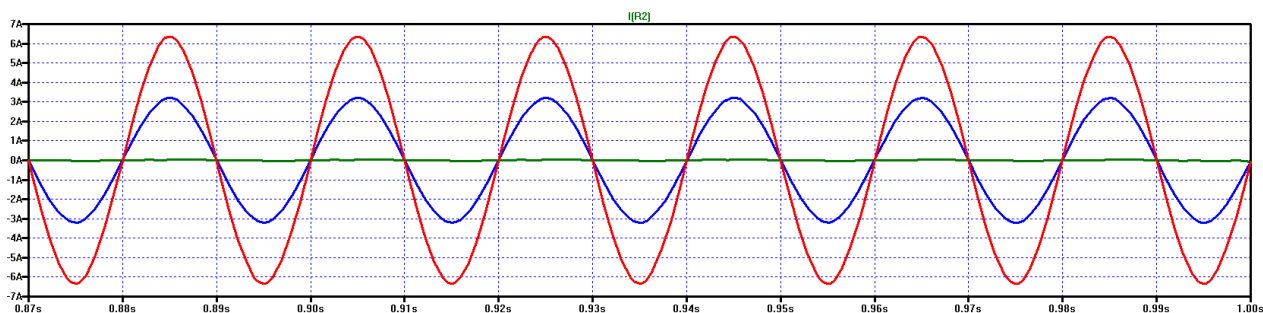


Obr. 19: Paralelní rezonanční obvod

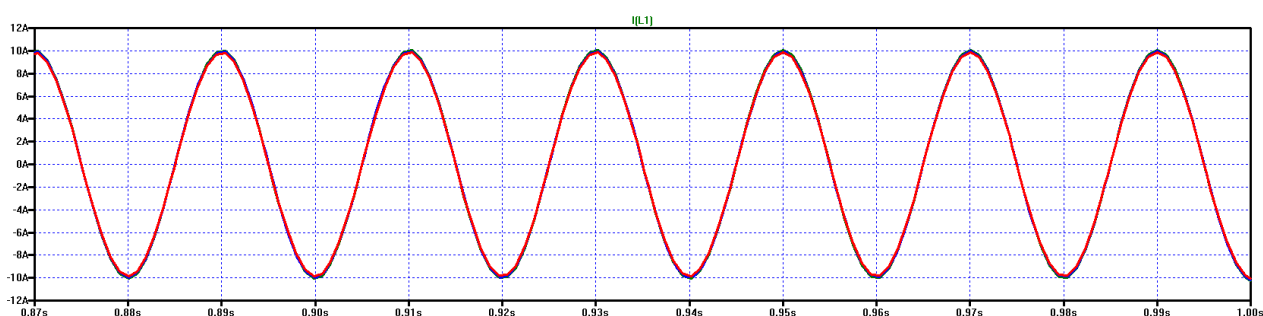
Na obrázku 20 najdete průběhy odběru proudu ze zdroje pro různé hodnoty ztrátového odporu  $R_1$ . Odběr proudu je dán pouze velikostí tohoto odporu a vnitřního odporu zdroje. Například pro  $R_1 = 50\Omega$  by amplituda proudu měla být  $I_{max} = 325/51 = 6,37A$ . Měřením jsme zjistili hodnotu  $6,33A$ , což je v rámci přesnosti simulace. Na dalším obrázku jsou průběhy proudu cívkou  $L_1$  – podle předpokladu jsou pro různé hodnoty  $R_1$  prakticky stejné. Zanedbáme-li vnitřní odpor zdroje, bude amplituda proudu cívkou

$$I_L = U/(\omega L) = 325/(2\pi \cdot 50 \cdot 0,1) = 10,345A \quad (17)$$

Pohledem na obr. 21 zjistíme, že výsledek simulace se přibližně shoduje s výpočtem. Amplituda proudu tekoucího kondenzátorem bude pochopitelně stejně velká jako u cívky.



Obr. 20: Průběhy odběru proudu ze zdroje pro různé hodnoty ztrátového odporu R1

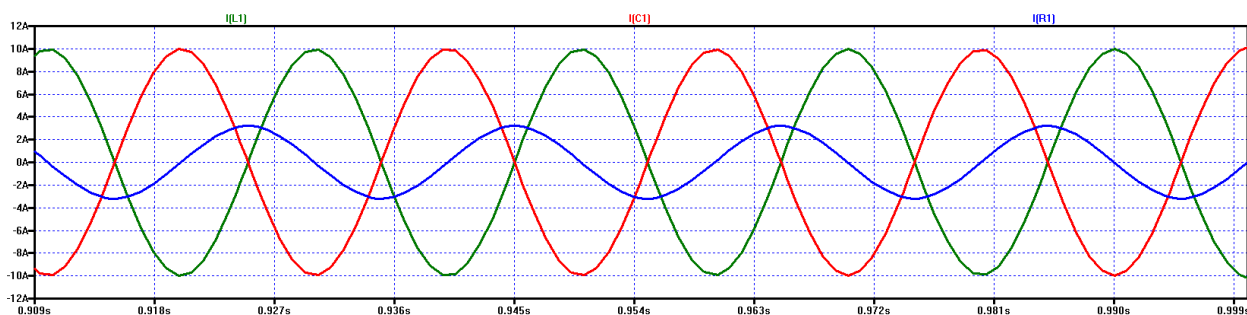


Obr. 21: Průběhy proudu cívkou L1 pro různé hodnoty ztrátového odporu R1

Činitel jakosti Q u paralelního rezonančního obvodu rovná poměru proudu  $I_L$  protékajícího cívkou ku odběru proudu ze zdroje  $I_Z$ . Na základě (1) a (17) dojdeme k

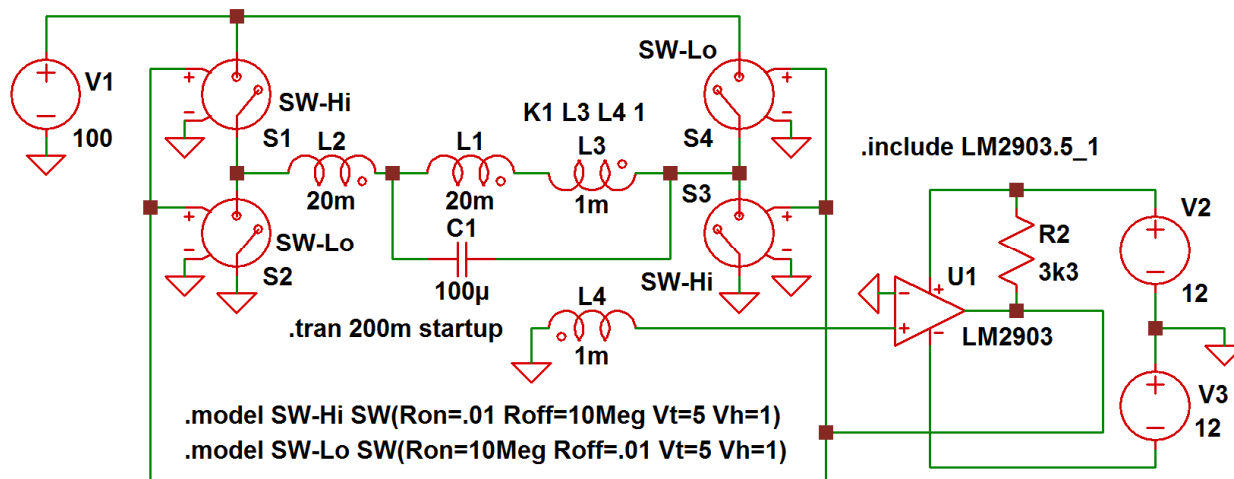
$$Q = I_L/I_Z = R/\omega L \quad (18)$$

Abychom mohli vytvořit oscilátor s paralelním rezonančním obvodem, musíme zjistit průběhy jednotlivých proudů v paralelním RLC obvodu:



Obr. 22: Průběhy proudů v paralelním RLC obvodu

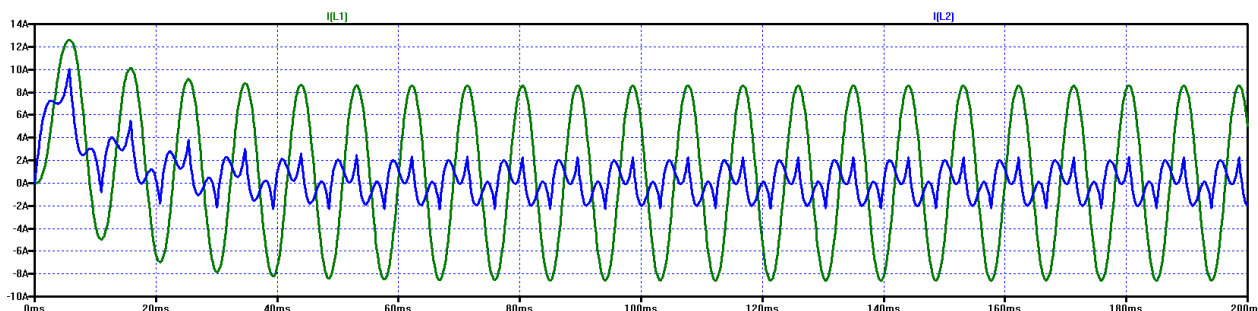
Z obr. 22 je zřejmé, že proud cívkou L1 je stejně velký jako proud kondenzátorem C1 a liší se pouze polaritou. Proud ztrátovým odporem je proti oběma zbývajícím proudům posunut o  $90^\circ$ . Tento proud je zároveň ve fázi s napětím zdroje  $V_1$ . Pokud budeme zpětnou vazbu odvozovat od proudu cívkou, musíme zajistit fázový posun o  $90^\circ$ . Nemůžeme přímo použít elektronický přepínač jako v případě oscilátoru se sériovým RLC obvodem, ale musíme buď mezi vlastní rezonanční obvod a elektronický přepínač zařadit cívku, nebo simulovat sinusový průběh pomocí PWM. Na obr. 23 najdete první způsob řešení oscilátoru s paralelním RLC obvodem.



Obr. 23: Oscilátor s paralelním RLC obvodem s předřazenou cívkou

Abychom dosáhli toho, že kladná a záporná amplituda proudu budou stejně velké, zvolili jsme čtyři spínače zapojené do H-můstku. Fázový posun o  $90^\circ$  zajišťuje proudový transformátor L3, L4 s otevřeným sekundárem.

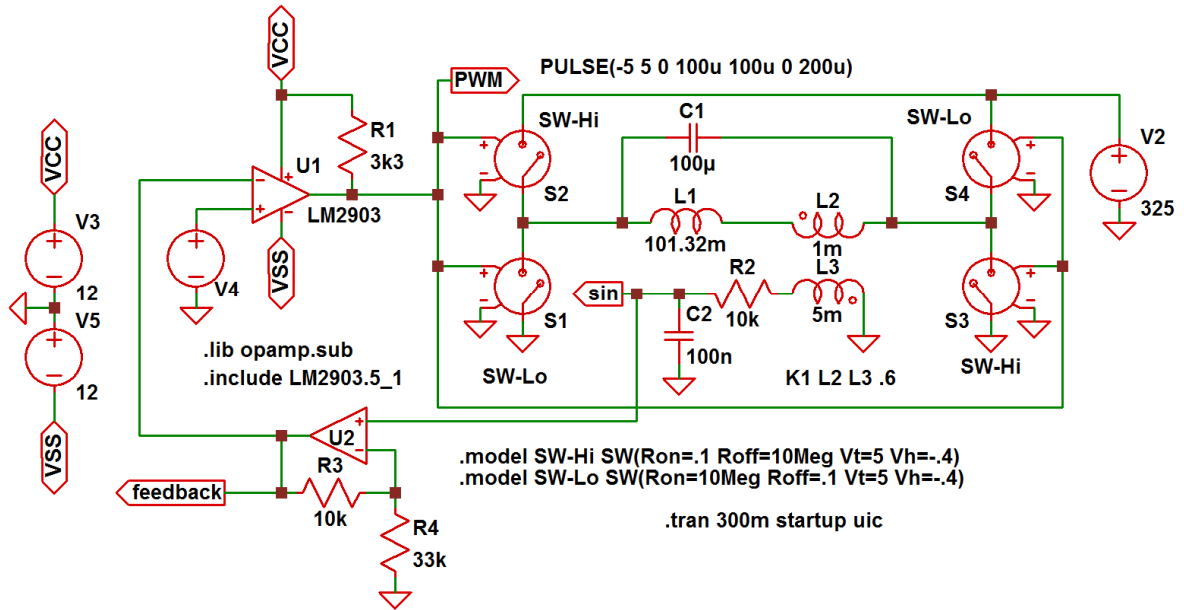
*Poznámka:* Není možné použít standardně vyráběný proudový transformátor, ale je nutné navinout vlastní, protože v případě komerčně vyráběného proudového transformátoru by napětí na otevřeném sekundáru bylo příliš vysoké.



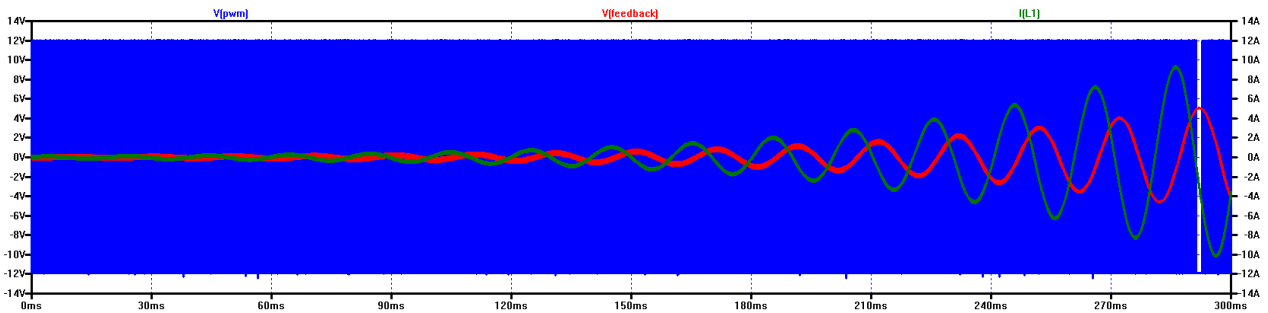
Obr. 24: Proudy cívkami L1 a L2 v oscilátoru na obr. 23

Na obr. 25 najdete oscilátor s paralelním RLC obvodem s šířkovou modulací. V tomto případě jsem se inspiroval technikou používanou u frekvenčních měničů. V4 je zdroj pilovitého průběhu. Na druhý vstup komparátoru U1 je proveden přibližně sinusový signál z výstupu zesilovače U2, takže na výstupu U1 dostaneme PWM signál simulující sinusovku. V tomto případě sice ušetříme jednu cívku, ale proud RLC obvodem není tak hladký jako v případě na obr. 23. Kromě toho je třeba nějakým způsobem stabilizovat amplitudu proudu. Jak se to dá zařídit si ukážeme na oscilátoru se sériovým RLC obvodem. Zavádět PWM u tohoto typu oscilátoru má smysl v případě nízkého Q, kdy dochází k deformaci sinusovky. Zpětnovazební signál je třeba vyfiltrovat pomocí RC filtru (R2, C2). Dále jsme tento signál mírně zesílili pomocí U2. Na obr. 26 máme několik signálů. Zpětnovazební signál (červený) je proti proudu (zelený) posunut o  $90^\circ$ . Dále si všimněte, že amplitudy obou sinusovek stále stoupají. Kdybychom simulovali dostatečně dlouho, došlo by k jejich zkreslení a v PWM signálu (modrý) by byly mezery. Proto je třeba stabilizovat amplitudu. Dělá se to tak, že se zavede záporná zpětná vazba od proudu a snižuje se zesílení pomocí vhodného prvku.

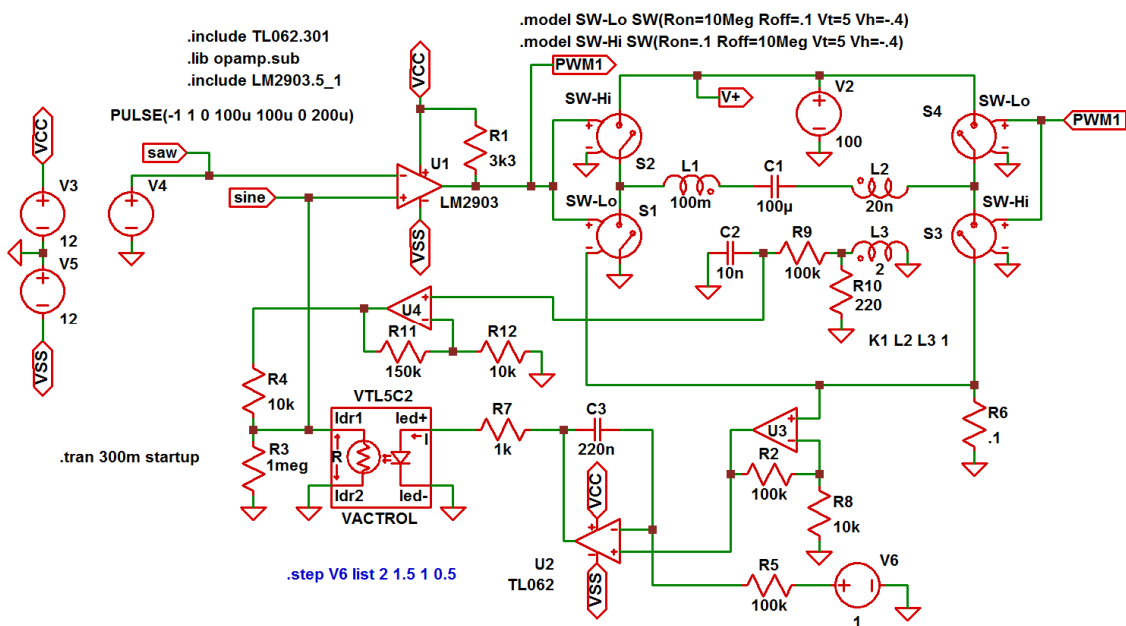




Obr. 25: Oscilátor s paralelním RLC obvodem s PWM

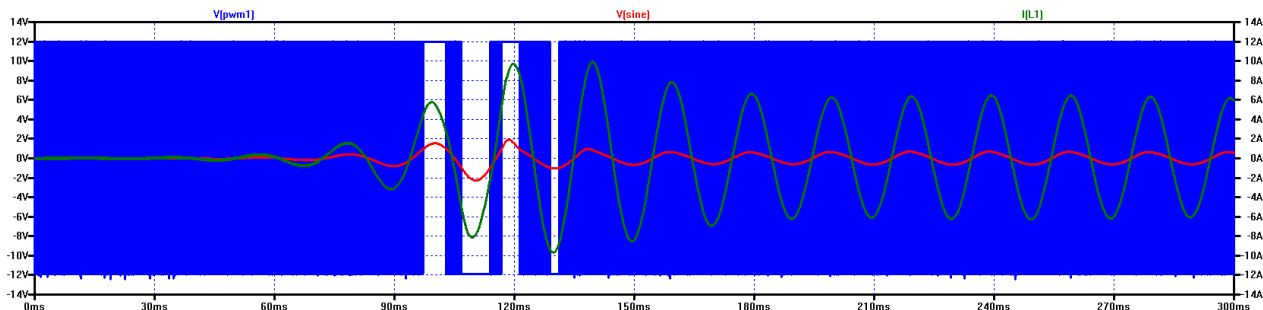


Obr. 26: Průběhy signálů v oscilátoru na obr. 25



Obr. 27: Sériový LC oscilátor s PWM a regulací amplitudy proudu

Na obr. 27 je příklad regulace amplitudy proudu u sériového LC oscilátoru s PWM. Jsou zde dvě zpětnovazební smyčky: První zpětná vazba je kladná a umožňuje kmitání oscilátoru. Je tvořena proudovým transformátorem a zesilovačem U4. Druhá zpětná vazba je záporná a slouží ke stabilizaci amplitudy proudu. Tvoří ji snímací odpor R6, integrační regulátor (U2, U3) a akční člen Vactrol (tj. optočlen s fotorezistorem), který omezuje velikost kladné zpětné vazby (dělič R3, R4). Na dalším obrázku můžete vidět, jak pěkně je regulován proud.



Obr. 28: Průběhy signálů v oscilátoru na obr. 27

A to je pro první seznámení s rezonančním motorem zhruba všechno. Další informace najdete na mém webu <http://free-energy.xf.cz> v sekci „Vynálezy a objevy“.

Lidé většinou nechápou, jak je možné, že rezonanční motor může za jistých podmínek pracovat s účinností přesahující 100%. Nakonec proto formou otázek ukážeme, že je to vlastně velmi prosté. Pokud u každé otázky odpovíte ano, potom věříte, že to možné je, přestože to třeba popíráte. Jdeme na to.

- 1) Jeví se sériový RLC obvod v rezonanci jako činný odpor?
- 2) Je amplituda proudu pro všechny rezonanční kmitočty u ideální cívky a ideálního kondenzátoru konstantní?
- 3) Roste na cílce amplituda napětí lineárně s rezonančním kmitočtem?
- 4) Roste u synchronního motoru v rezonančním režimu se zátěží i činitel jakosti Q?
- 5) Je odběr proudu v sériovém RLC obvodu v rezonanci pro všechny reálné rezonanční kmitočty konstantní nebo nestoupá?
- 6) Je vzorec  $P = \omega M$  pro výpočet výkonu motoru správný?
- 7) Dá se předpokládat, že při konstantním proudu v určitém rozsahu otáček bude konstantní i kroučící moment M?
- 8) Způsobují vířivé proudy snížení činitele jakosti Q?
- 9) Je účinnost poměr výkonu ku příkonu?
- 10) Způsobuje skluz u indukčního motoru snížení činitele jakosti Q?

Odpovědi na všech 10 otázek najdete buď v tomto článku, nebo na ně přijdete selským rozumem. Pokud jste na všechny odpověděli ano, potom věříte, že je možné vytvořit rezonančně řízený motor, jeho účinnost přesáhne 100%. Přitom musí být splněny následující podmínky:

- 1) Pro magnetický obvod použít materiál s co nejvyšším činným odporem.
- 2) V rotoru použít permanentní magnety (nikoli kotvu nakrátko).
- 3) Pro rezonanční řízení použít oscilátor se sériovým RLC obvodem.
- 4) Použít kondenzátory s nízkým ESR.