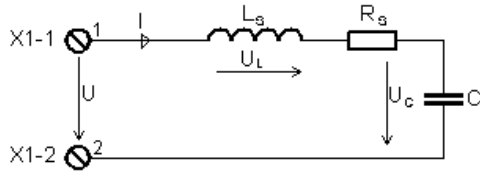
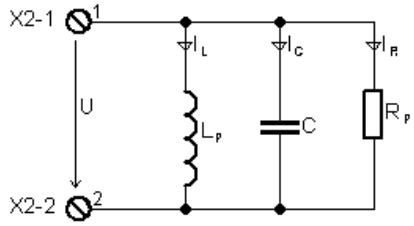


REZONANČNÍ MOTOR – přehled

1. Vlastnosti sériové a paralelní rezonance

| Č. řádku | Vlastnost | Sériová rezonance | Paralelní rezonance |
|----------|-------------------------------------|---|---|
| 1 | Schéma zapojení |  |  |
| 2 | Impedance v rezonanci | Nejmenší | Největší |
| 3 | Činitel jakosti Q | $Q = \omega L_s / R_s = U_L / U = U_C / U$ | $Q = R_p / \omega L_p = I_L / I = I_L / I, I = I_R$ |
| 4 | Podmínka rezonance | $\omega^2 = 1/LC$ | $\omega^2 = 1/LC$ |
| 5 | Výpočet proudu v rezonanci | $I_L = I_C = I = U/R$ | $I_L = U/X_L = U/\omega L$ $I_C = U/X_C = U \cdot \omega C$ $I_L = - I_C$ |
| 6 | Napětí na C nebo L s rez. frekvencí | Roste | Nemění se |
| 7 | Výpočet napětí na L a C | $U_L = I \cdot X_L = I \cdot \omega L$ $U_C = I \cdot X_C = I / \omega C$ $U_L = - U_C$ | Napětí na L a C = Napětí zdroje |

Tabulka 1: Vlastnosti sériového a paralelního rezonančního obvodu

2. Oscilátory

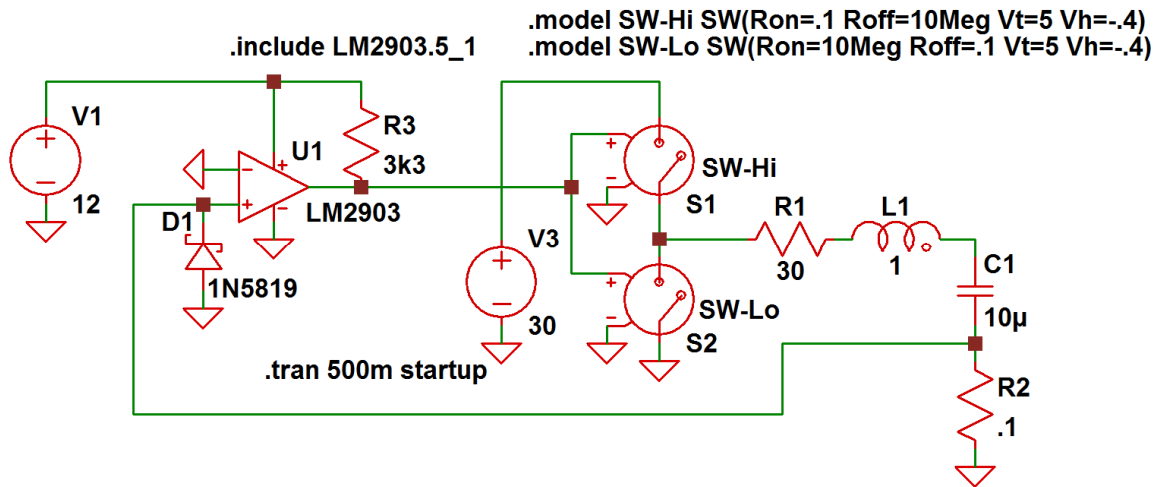
2.1. Sériová rezonance

2.1.1. Polomost

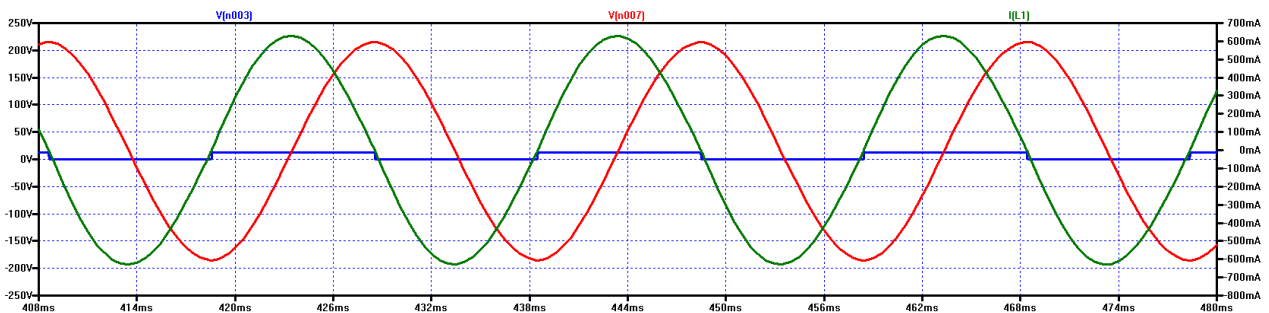
Na obr. 1 je zapojení oscilátoru se sériovým rezonančním obvodem v půlmůstkovém zapojení. Elektronický prepínač tvoří dva ideální spínače. Na obr. 2 je výsledek simulace. Význam jednotlivých průběhů je následující:

- Zelená = proud rezonančním obvodem

- Modrá = napětí na výstupu komparátoru U1
- Červená = napětí na kondenzátoru C1 proti zemi

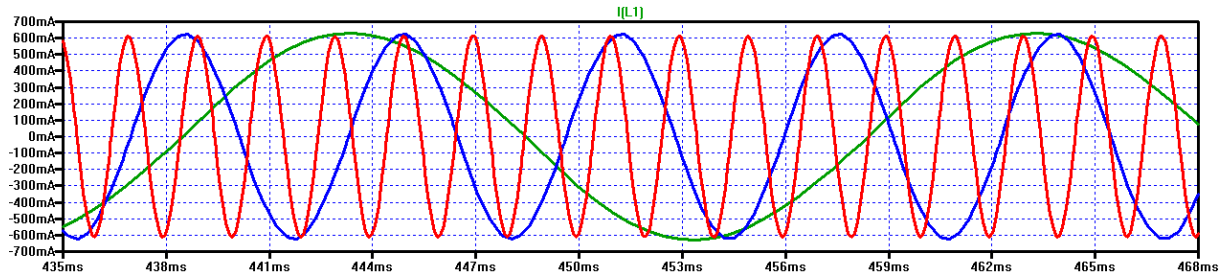


Obr. 1



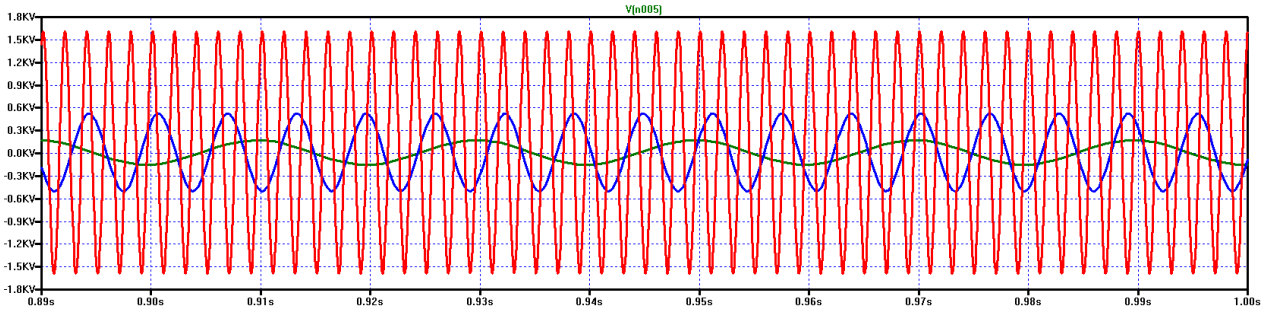
Obr. 2

Na obr. 3 máme zobrazeny průběhy proudu RLC obvodu v závislosti na hodnotě kapacity rezonančního kondenzátoru, konkrétně pro následující hodnoty: 10µF, 1µF a 100nF.



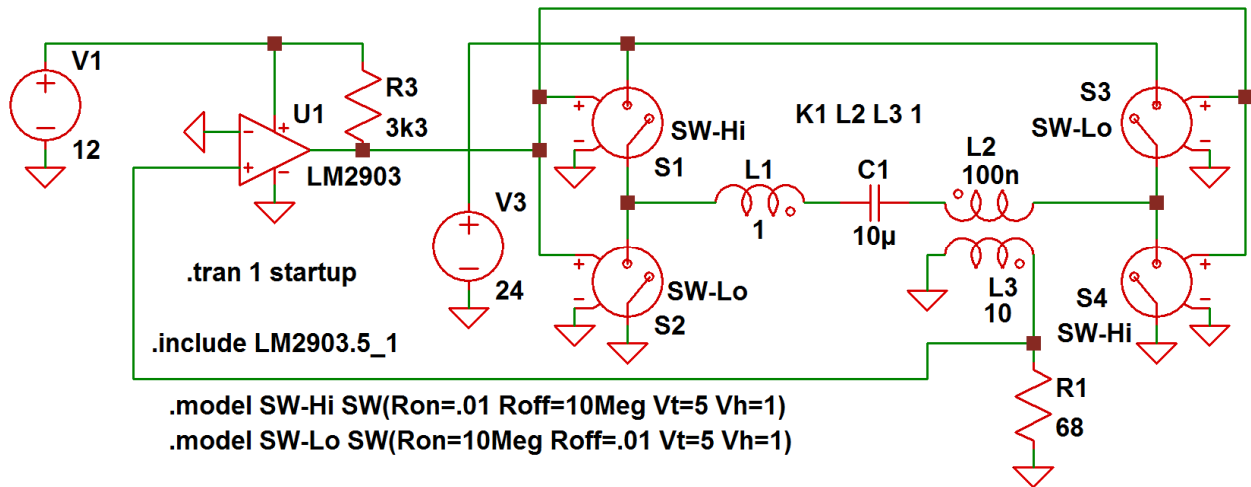
Obr. 3: Průběhy proudu v oscilátoru pro různé hodnoty C1

Všimněte si, že amplituda se s frekvencí nemění. Vysvětlení najdete v 5. řádku tabulky 1 (Výpočet proudu v rezonanci). Na dalším obrázku (obr. 4) najdete průběhy napětí na kondenzátoru C1 pro tyto kapacity. Všimněte si, že amplituda roste s frekvencí. Vysvětlení tohoto jevu najdete v posledním řádku tabulky 1 (Výpočet napětí na L a C).

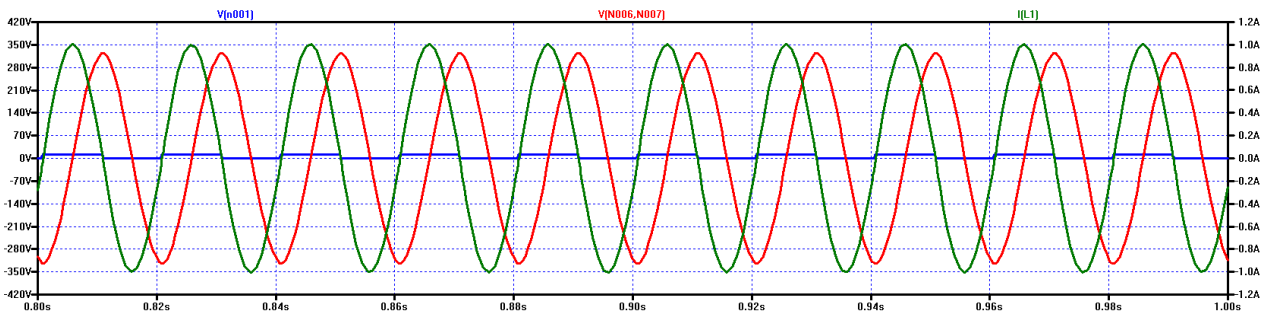


Obr. 4: Průběhy napětí na kondenzátoru C1 pro různé hodnoty jeho kapacity

2.1.2. Celomost



Obr. 5



Obr. 6

Legenda k obr. 6:

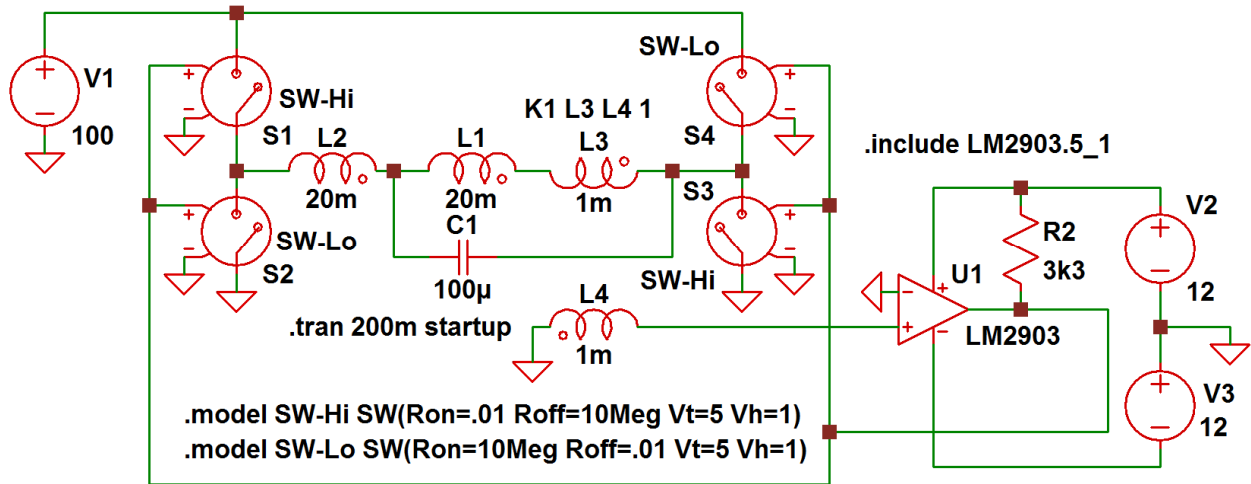
- Zelená = proud rezonančním obvodem
- Modrá = napětí na výstupu komparátoru U1
- Červená = napětí na kondenzátoru C1

Na obr. 6 jsou průběhy proudu a napětí v celomůstkovém zapojení oscilátoru. Všimněte si, že:

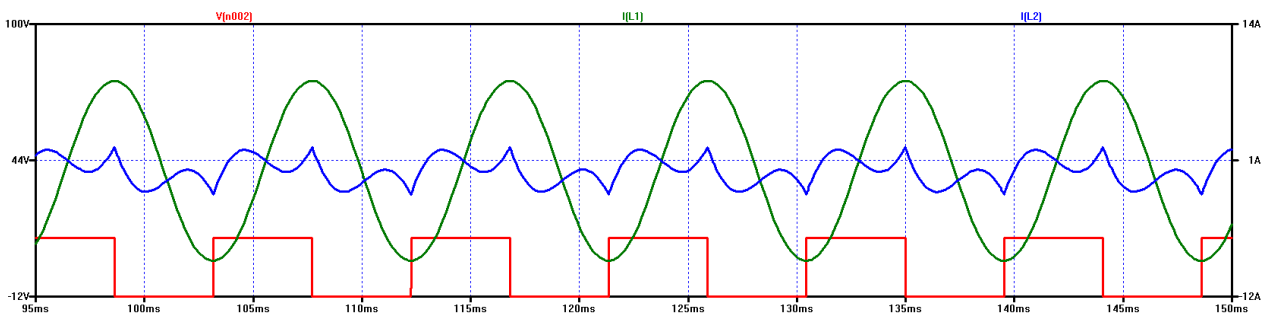
- 1) Průběhy napětí na výstupu komparátoru a proudu mají nulový fázový posun a
- 2) Průběh napětí na kondenzátoru C1 je proti proudu posunut o 90° .

2.2. Paralelní rezonance

2.2.1. Se zpětnovazebním transformátorem



Obr. 7



Obr. 8

Legenda k obr. 8:

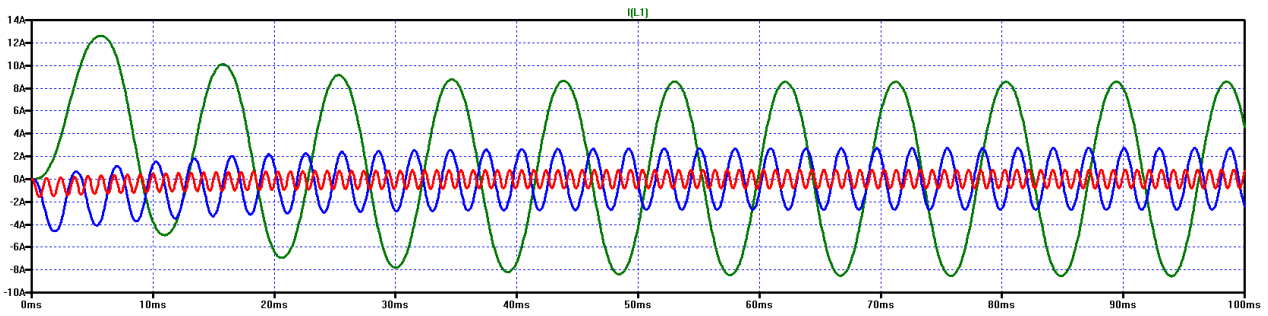
- Zelená = proud rezonanční cívkou L1
- Červená = napětí na výstupu komparátoru U1
- Modrá = proud předřadnou cívkou

Na obr. 8 jsou průběhy proudů a napětí v celomůstkovém zapojení oscilátoru s paralelním rezonačním obvodem s předřadnou cívkou a zpětnovazebním transformátorem. Všimněte si, že:

- 1) Průběh řídicího napětí na výstupu komparátoru je proti proudu posunut o 90° a
- 2) Amplituda proudu tekoucího předřadnou cívkou je menší než amplituda proudu v paralelním rezonačním obvodu.

Fázového posunu mezi proudem rezonančního obvodu a řídicím napětím je dosaženo pomocí transformátoru, jehož primární vinutí je zapojeno v sérii s rezonanční cívkou (jako u proudového transformátoru) a jehož sekundární vinutí je otevřené, tj. bez zatěžovacího odporu (na rozdíl od proudového transformátoru).

Oscilátor s paralelním rezonačním obvodem pro účely rezonančního řízení motorů by měl být vždy v celomůstkovém zapojení, jinak bude mít proud v obvodu stejnosměrnou složku.

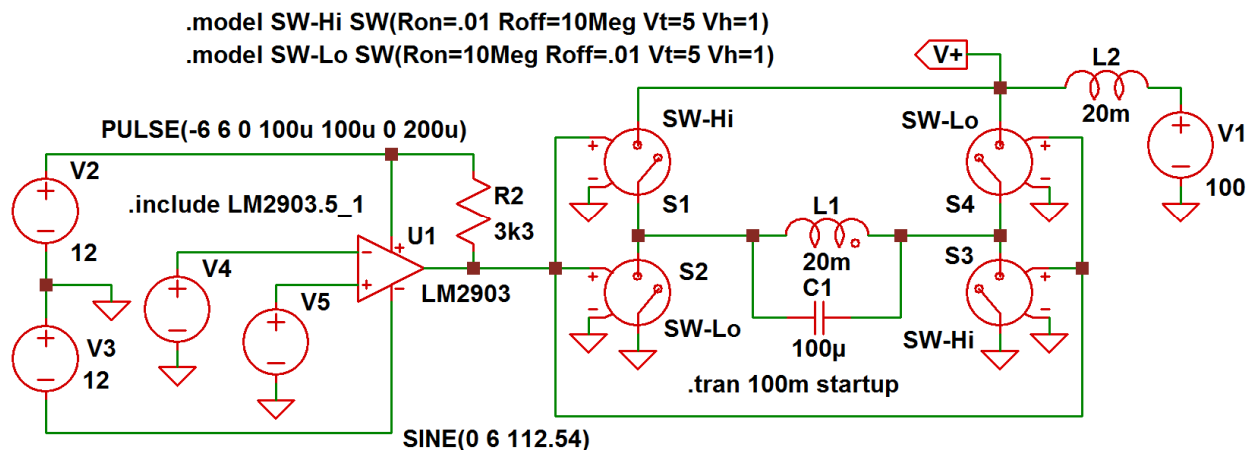


Obr. 9: Závislost proudu v paralelním rezonančním obvodu na rezonanční frekvenci

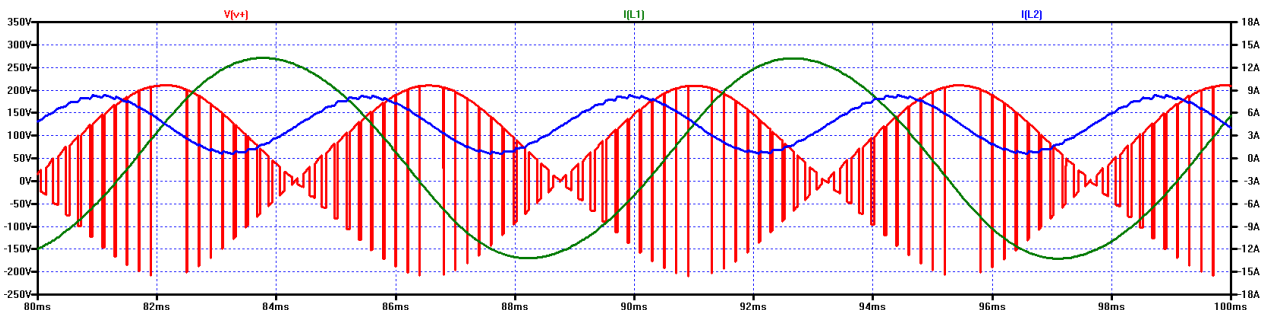
U sériového rezonančního obvodu je proud jím procházející nezávislý na frekvenci. U paralelního rezonančního obvodu je proud na frekvenci závislý nepřímo úměrně, tj. čím větší frekvence, tím menší proud, jak ilustruje obr. 9. Vysvětlení najdete v 5. řádce tabulky 1 (Výpočet proudu v rezonanci).

2.2.2. Se šířkovou modulací

Pokud se chceme vyhnout použití oscilátoru, použijeme princip šířkové modulace, který se používá u frekvenčních měničů. Frekvenci nastavíme pevnou. Frekvenci sinusového signálu naladíme na rezonanční kmitočet paralelního rezonančního obvodu. Tohoto způsobu použijeme tehdy, když rezonanční obvod má nižší činitel jakosti Q a nepotřebujeme měnit rezonanční kmitočet pomocí rezonančního kondenzátoru.



Obr. 9: Paralelní rezonance s PWM

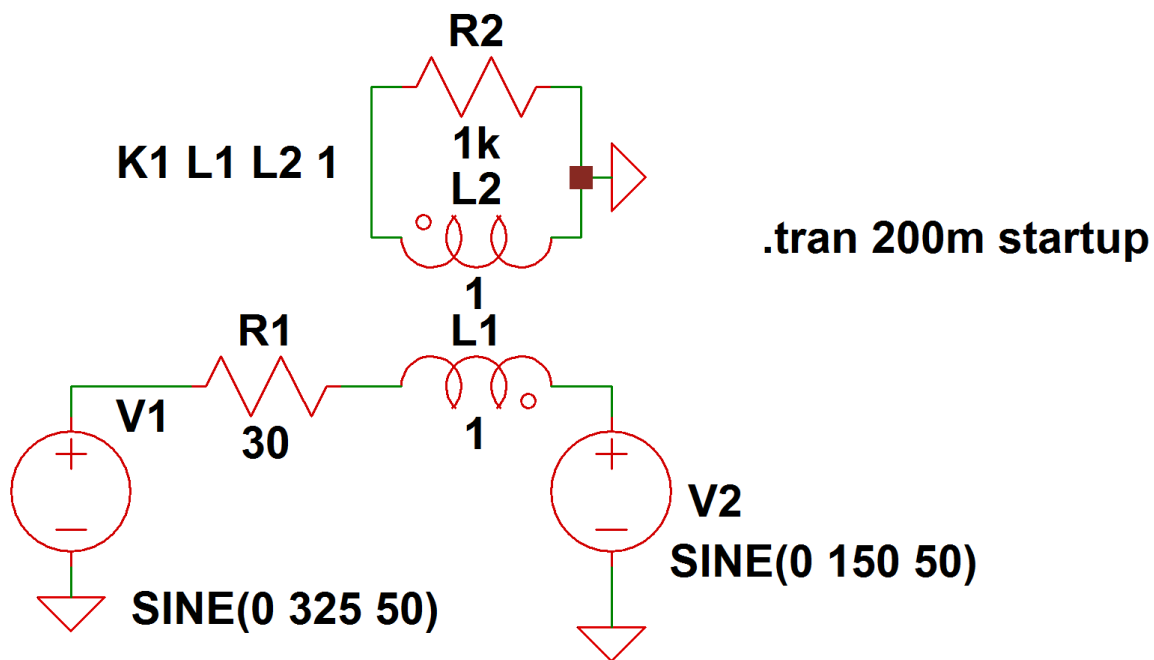


Obr. 10

Stejně jako v případě se zpětnou vazbou (obr. 7) musí být předřazena cívka o stejné indukčnosti. V druhém případě však cívka je umístěna do série s napájecím zdrojem.

3. Modely střídavých motorů pro simulaci

Pokud budeme chtít rezonančně řídit běžné střídavé motory, které jsou na trhu, nemůžeme chování takového motoru popsat jednoduchou cívkou, ale musíme vytvořit modely. Můžeme vlastně vytvořit jeden společný model pro různé typy střídavých motorů, přičemž u každého typu je jiný poměr velikostí parametrů modelu. Obecný model motoru se skládá z transformátoru, jehož sekundární vinutí je zatíženo odporem, a zdroje střídavého napětí. Odpor na sekundáru obecně představuje ztráty, zatímco střídavý zdroj představuje napětí indukované ve statorové cívce vlivem rotace magnetického pole v rotoru.



Obr. 11: Model střídavého motoru

Nyní se podíváme na vlastnosti modelů jednotlivých typů motorů. Téměř všechny elektromotory jsou vyrobeny z izolovaných ocelových plechů s příměsí křemíku, aby se zajistil co největší elektrický odpor magnetického obvodu. Toto opatření je z toho důvodu, aby se zabránilo vzniku vířivých proudů. Pokud je naší prioritou co nejvyšší účinnost rezonančního řízení, s tímto opatřením k potlačení vířivých proudů se nemůžeme spokojit, ale musíme najít takové materiály, které jsou doslova izolanty, jako je například ferit.

Uvnitř každého elektromotoru, s výjimkou spínaných reluktančních motorů (SRM), rotuje magnetické pole. Toto magnetické pole indukuje v cívkách statoru elektrické napětí, jehož amplituda a frekvence se liší v závislosti na typu motoru.

3.1. Model asynchronního motoru

V asynchronním motoru se rotor točí úhlovou rychlostí, která je nižší než je úhlová rychlost točivého magnetického pole. Rozdíl frekvencí těchto rotací se říká skluzová frekvence nebo zkráceně skluz. Když motor mechanicky zatížíme, skluz se zvýší a v rotoru se indukují větší proudy, což vyvolá větší spotřebu proudu. Při rozběhu se skluzová frekvence rovná frekvenci sítě, takže dochází k proudovému rázu. Jaký to má vliv při rezonančním řízení? Znamená to, že dramaticky poklesne činitel jakosti Q a tím i účinnost rezonančního řízení. U sériového rezonančního řízení se to projevuje poklesem proudu, zatímco u paralelního rezonančního obvodu dojde ke zvýšení odběru proudu. Co tedy můžeme říci o modelu asynchronního

motoru? Odpor R_2 (viz obr. 11) je proměnlivý a závisí na velikosti skluzu. Zdroj indukovaného napětí V_2 má proměnlivou frekvenci i amplitudu napětí, které závisí na skluzové frekvenci.

3.2. Model synchronního motoru

U synchronního motoru, jak už plyne z názvu, se rotor točí stejnou rychlostí jako magnetické pole statoru. S rostoucím mechanickým zatížením motoru se zvyšuje fázový posun mezi napájecím napětím V_1 a indukovaným napětím V_2 . Je-li rotor nezatížený, je v ideálním případě fázový posun těchto dvou napětí 180° . V důsledku změny fázového posunu roste odběr proudu motoru.

3.3. Model stejnosměrného motoru s elektronickou komutací (BLDC)

O BLDC motoru můžeme říci to, že si střídavé napájecí napětí vytváří vlastně sám pomocí elektronických spínačů v závislosti na poloze rotoru. Můžeme tedy říci, že fázový posun mezi napájecím a indukovaným napětím je konstantní a frekvence jak otáčení rotoru, tak indukovaného napětí závisí na mechanickém zatížení motoru.

3.4. Shrnutí

Na základě výše uvedené analýzy fungování jednotlivých typů motorů můžeme sestavit tabulku vlastností jejich modelů.

| Typ motoru | Hodnota R_2 | Činitel jakosti Q | Indukované napětí | | |
|-------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------|------------|------------|
| | | | frekvence | amplituda | fáze |
| Asynchronní | Klesá se zatížením motoru | Klesá se zatížením motoru | Proměnlivá | Proměnlivá | Proměnlivá |
| Synchronní | Konstantní | Roste se zatížením i otáčkami | Konstantní | Konstantní | Proměnlivá |
| BLDC | Konstantní | Roste s otáčkami | Proměnlivá | Proměnlivá | Konstantní |

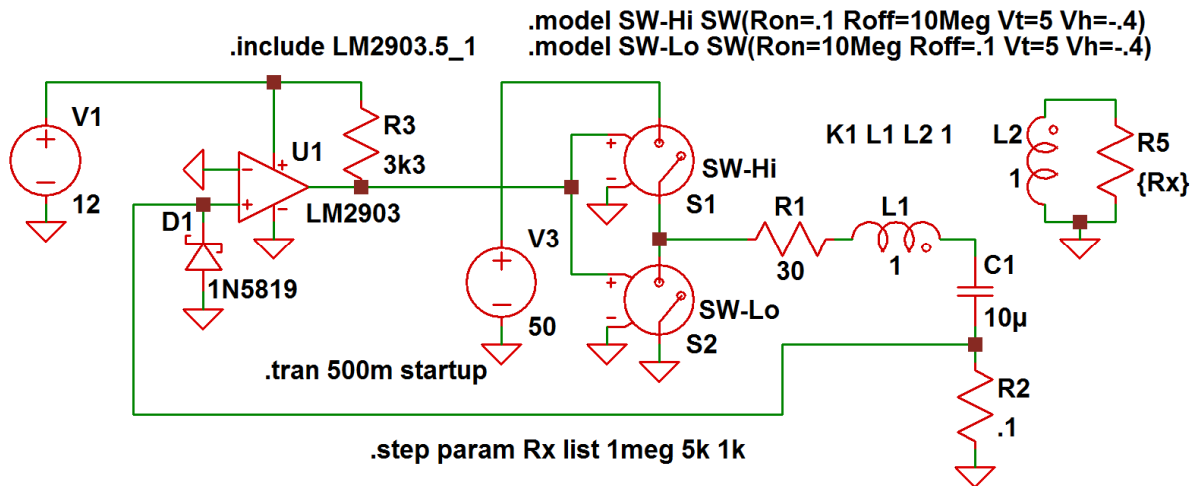
Tabulka 2: Vlastnosti modelů jednotlivých typů motorů

Na základě tabulky 2 můžeme určit, jaký druh rezonančního řízení použijeme pro daný typ motoru.

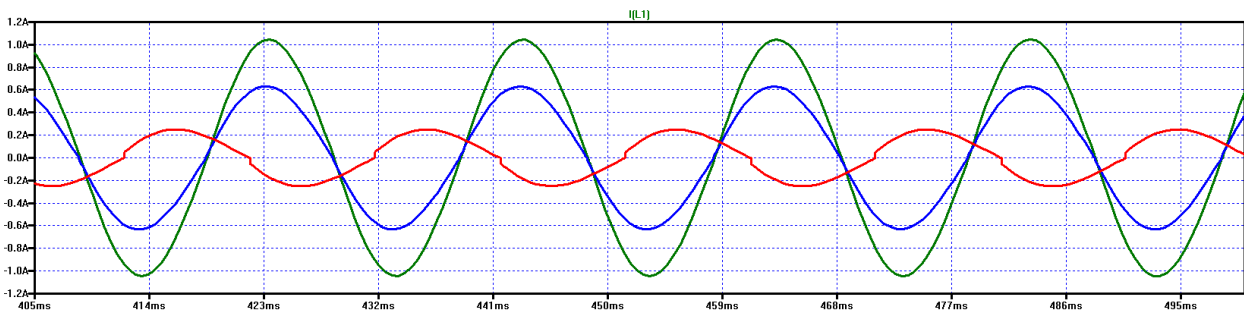
Pro asynchronní motor s výhodou použijeme paralelní rezonanci, čímž dosáhneme toho, že se zatížením motoru nebude klesat proud jako u sériové rezonance, ale bude stoupat jako při běžném provozu. Musíme však počítat s tím, že velikost napájecího napětí bude závislá na rezonanční frekvenci, resp. na velikosti rezonanční kapacity. U tohoto typu motoru se nebudeme snažit omezovat vířivé proudy, protože skluz činitel jakosti stejně spolehlivě sníží.

U synchronního motoru můžeme použít jak sériovou, tak paralelní rezonanci. V obou případech můžeme volbou materiálu magnetického obvodu dosáhnout vysokého Q.

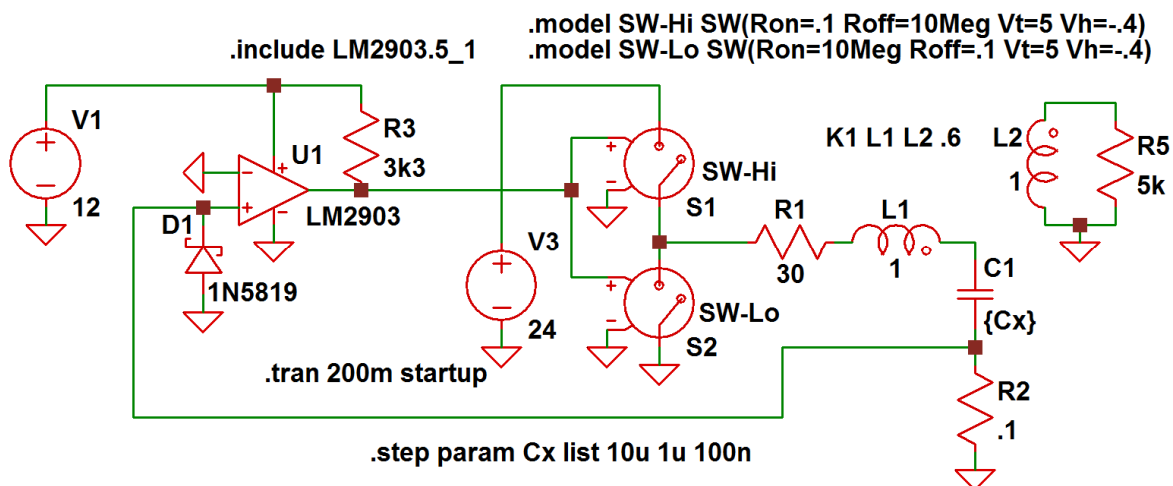
To samé platí i pro BLDC motory, ale s tím rozdílem, že nemůžeme jednoduše použít oscilátory, ale musíme postupovat tak, že motor nejdříve roztočíme bez kondenzátorů a kondenzátory zařadíme do obvodu po dosažení rezonančních otáček. Ke stabilizaci otáček můžeme použít součinnové hradlo a oscilátor (viz obr 16 a 17). Více podrobností najdete v článku REZONANČNÍ MOTOR polopatě, který se modely motorů podrobně zabývá.



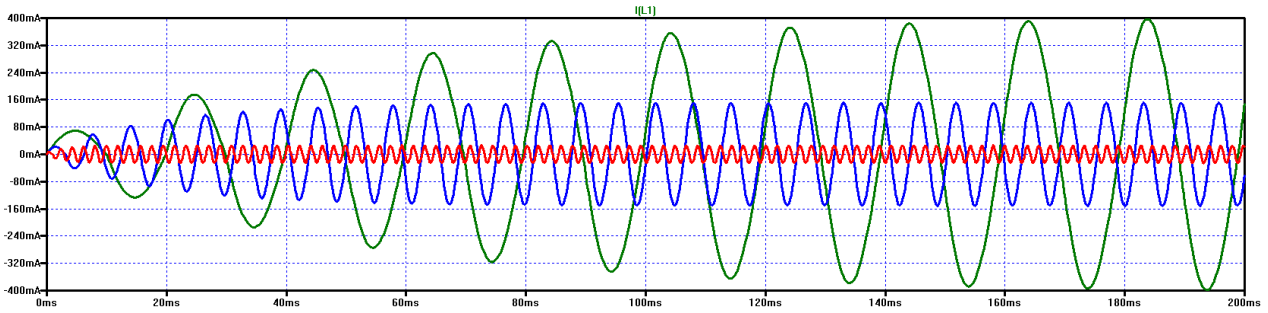
Obr. 12: Rezonanční řízení indukčního motoru – modelování změny skluzu



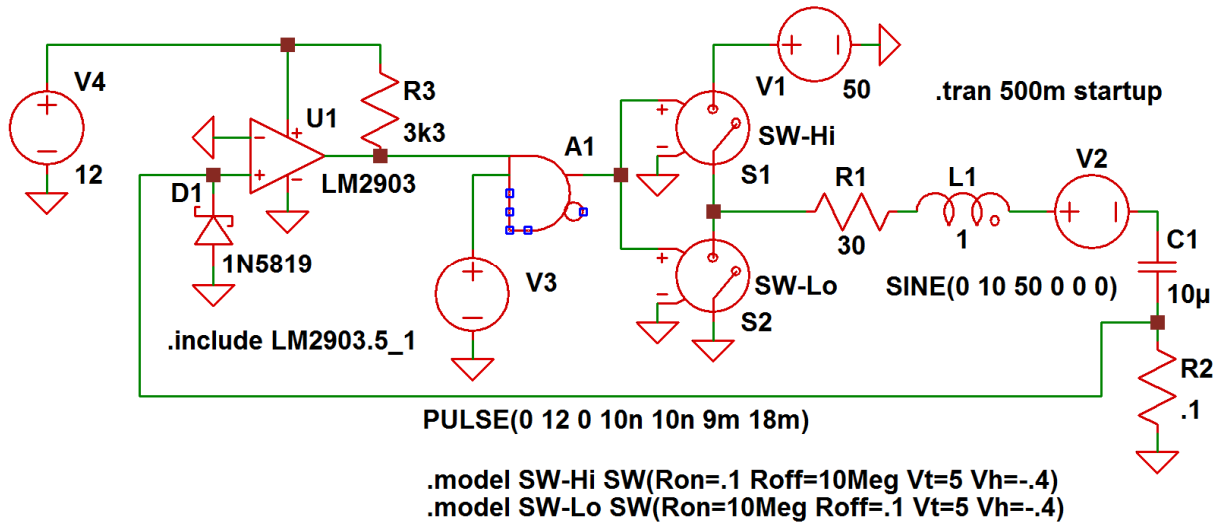
Obr. 13: Simulace změny velikosti skluzu



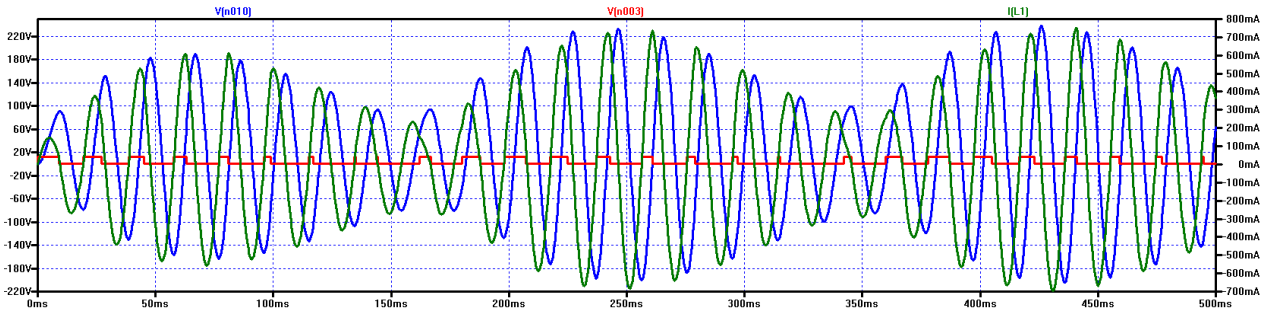
Obr. 14: Simulace vlivu vřivých proudů pro různé frekvence – schéma zapojení



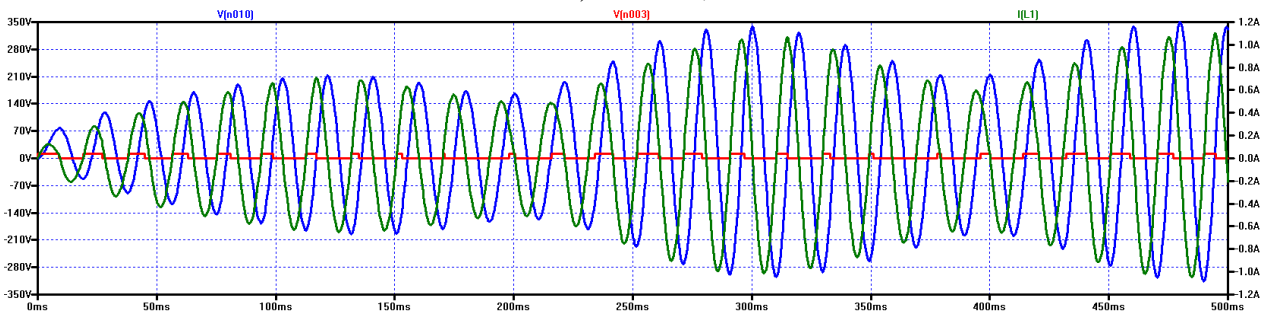
Obr. 15: Simulace vlivu vířivých proudů pro různé frekvence – průběhy veličin



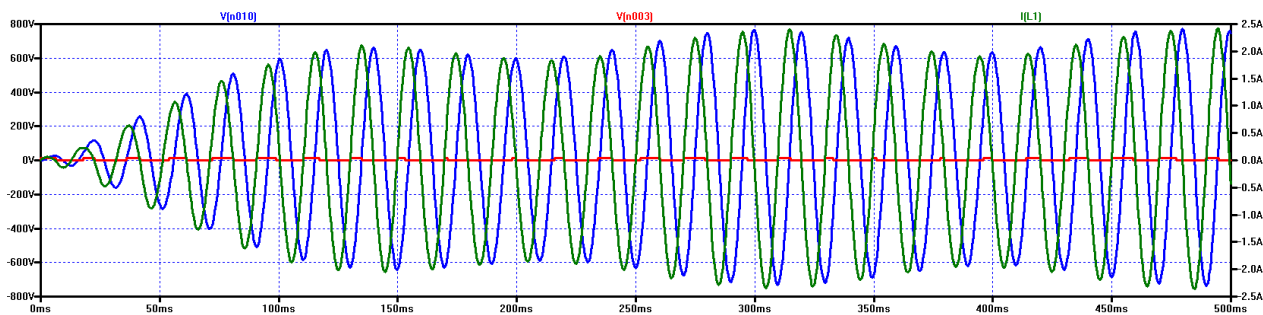
Obr. 16: Rezonanční řízení BLDC motoru pomocí oscilátoru – schéma zapojení



a) $V_2 = 0,1V$



b) $V_2 = 10V$

c) $V_2 = 50V$

Obr. 17: Rezonanční řízení BLDC motoru pomocí oscilátoru – průběhy veličin

4. Aplikační možnosti rezonančního řízení

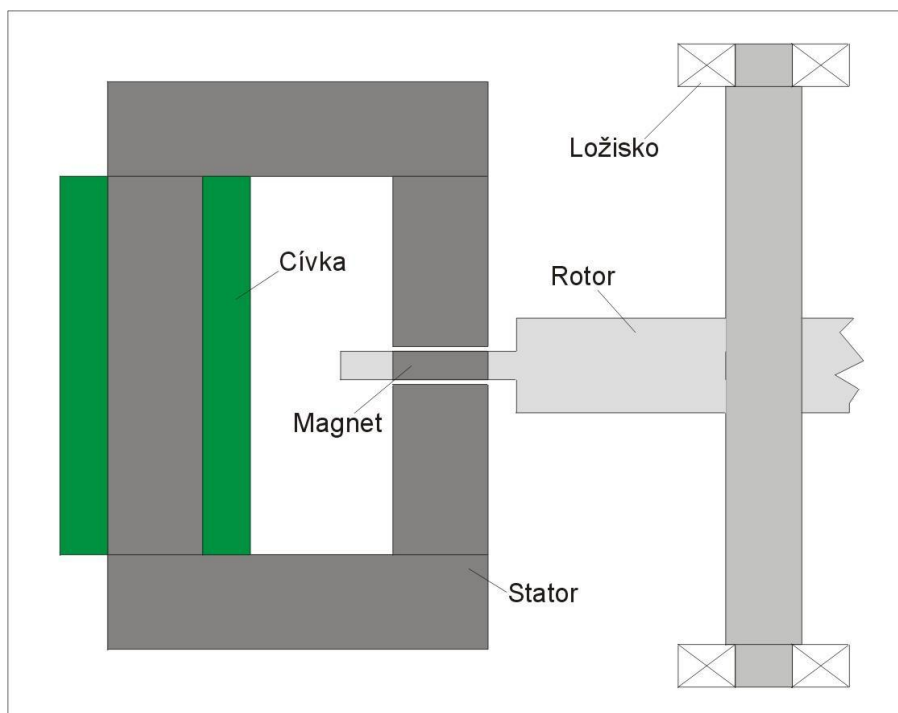
4.1. Ostrovní systémy

Pomocí rezonančně řízených motorů napájených DC proudem se lze zbavit drahých střídačů. Zároveň dojde ke snížení spotřeby energie.

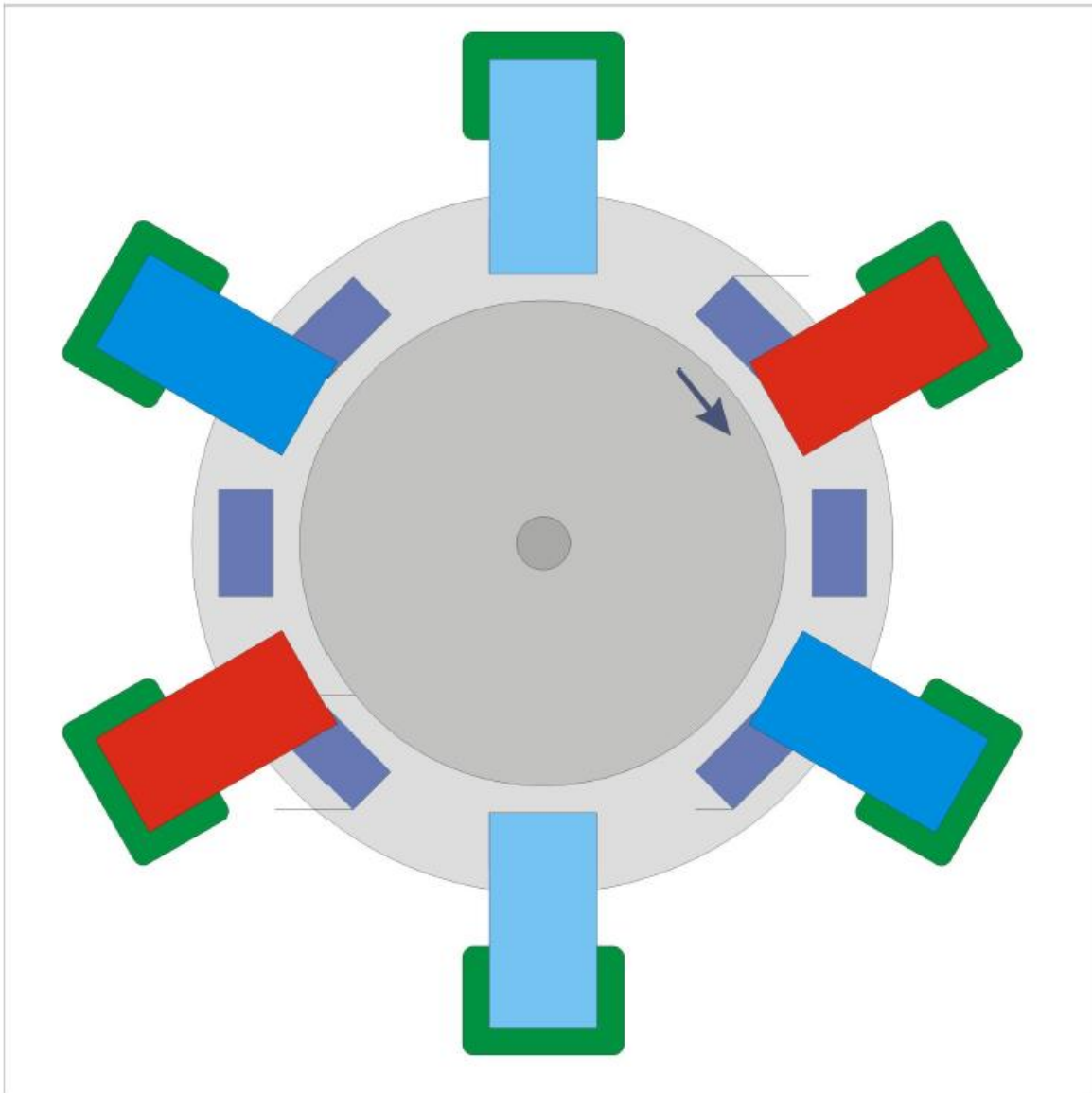
4.2. Elektrická trakce

S využitím rezonance a s použitím speciálních materiálů lze docílit zvýšení dojezdu elektrických vozidel. Lze použít jak BLDC, tak asynchronní motory. U asynchronních motorů s výhodou využijeme faktu, že při nízkých otáčkách teče paralelním RLC obvodem velký proud, což umožní zvětšení krouticího momentu při rozjezdu.

4.3. Motorgenerátory



Obr. 18: Řez motorgenerátorem



Obr. 19: Motorgenerátor – pohled shora

S použitím speciální konstrukce (viz obrázky výše) a s využitím speciálních materiálů můžeme vytvořit rezonančně řízené motorgenerátory s $COP > 1$. Praxe ukázala, že pro řízení lze s výhodou použít principu BLDC motoru v kombinaci s oscilátorem, jak ukazuje obr. 16. Toto schéma bylo vytvořeno pouze pro ilustraci principu. V praxi však musíme použít úplný H-můstek, protože BLDC motor musíme rozběhnout na rezonanční otáčky bez kondenzátoru.