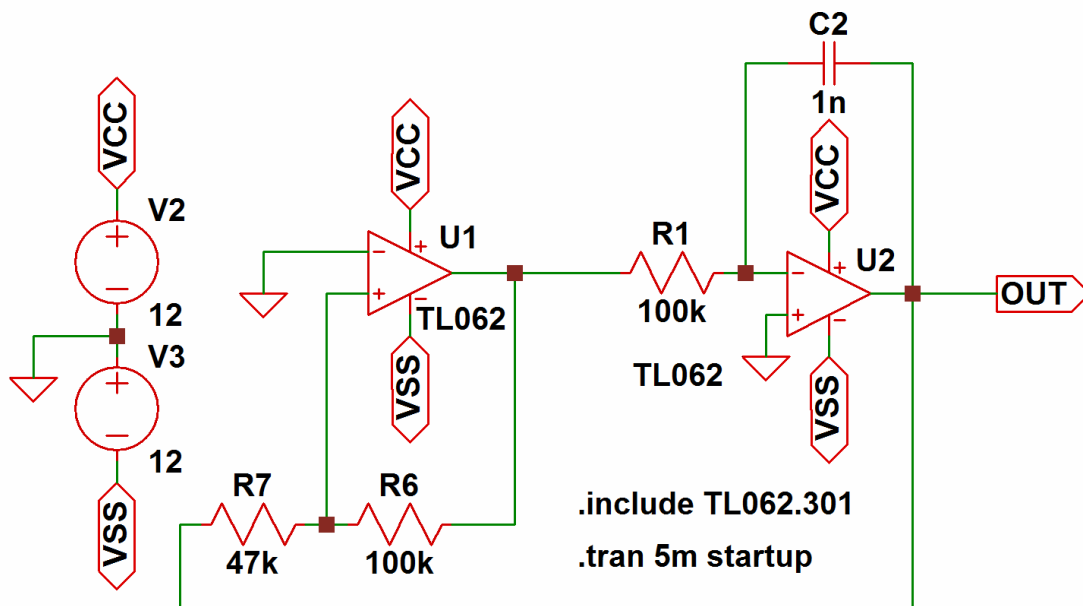


# REZONANČNÍ MOTOR polopatě V

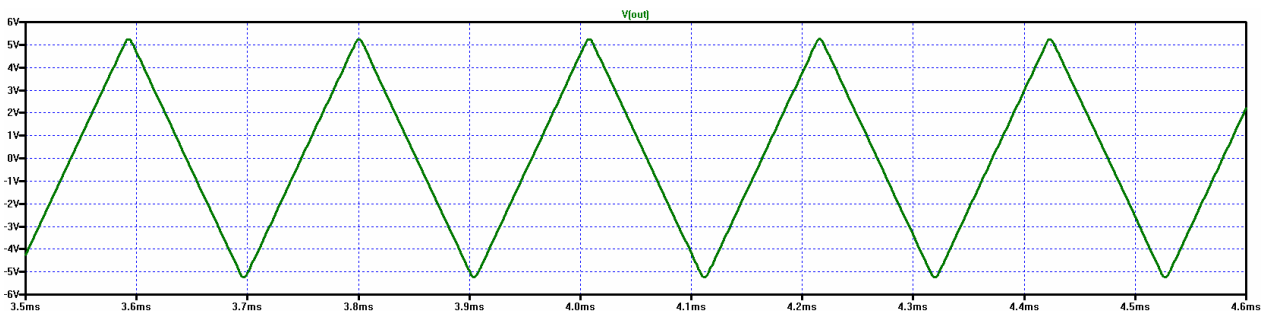
(c) Ing. Ladislav Kopecký, listopad 2015

V minulé části jsme skončili návrhem oscilátoru se sériovým RLC obvodem a šířkovou modulací (PWM) simulující harmonický průběh napájení. Tento typ oscilátoru je vhodné použít pro současné běžně vyráběné motory, které způsobují zkreslení sinusového průběhu proudu vlivem vířivých proudů a/nebo skluzu. Podotýkám, že motory s vysokým činitelem jakosti nic takového nepotřebují, neboť u nich jsou vyšší harmonické složky spolehlivě odfiltrovány. Přesto toto technické řešení má velký význam, protože umožňuje rezonančně řídit v podstatě libovolné střídavé motory. Navíc je zde výhoda, že pro horní spínače můžeme použít levné řešení s nábojovou pumpou (dioda + kondenzátor) a nepotřebujeme drahý DC/DC měnič.

Součástí oscilátoru s PWM je zdroj pilového průběhu. Na obr. 1 máme klasické zapojení generátoru pily s komparátorem a integrátorem. Byl použit integrovaný obvod TL062 se dvěma operačními zesilovači v jednom pouzdře.

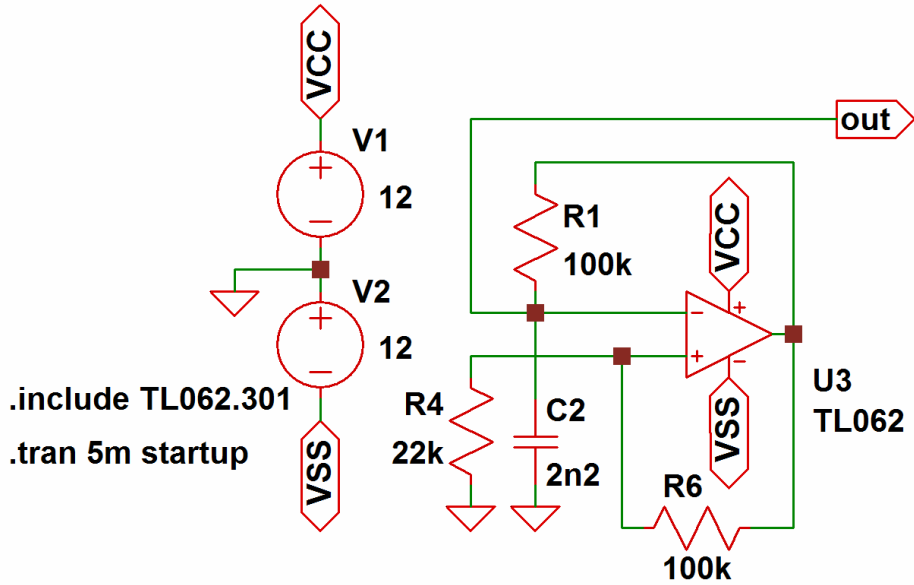


Obr. 1: Klasické zapojení generátoru pily se dvěma OZ

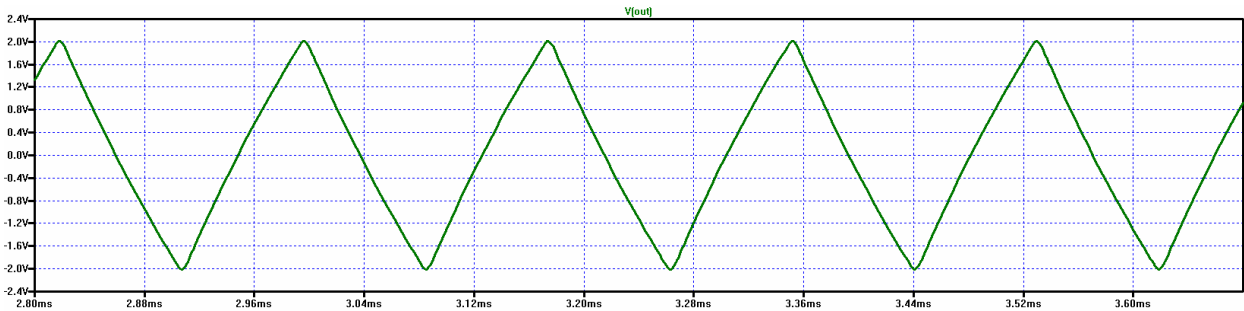


Obr. 2: Pilovitý průběh napětí na výstupu generátoru z obr. 1

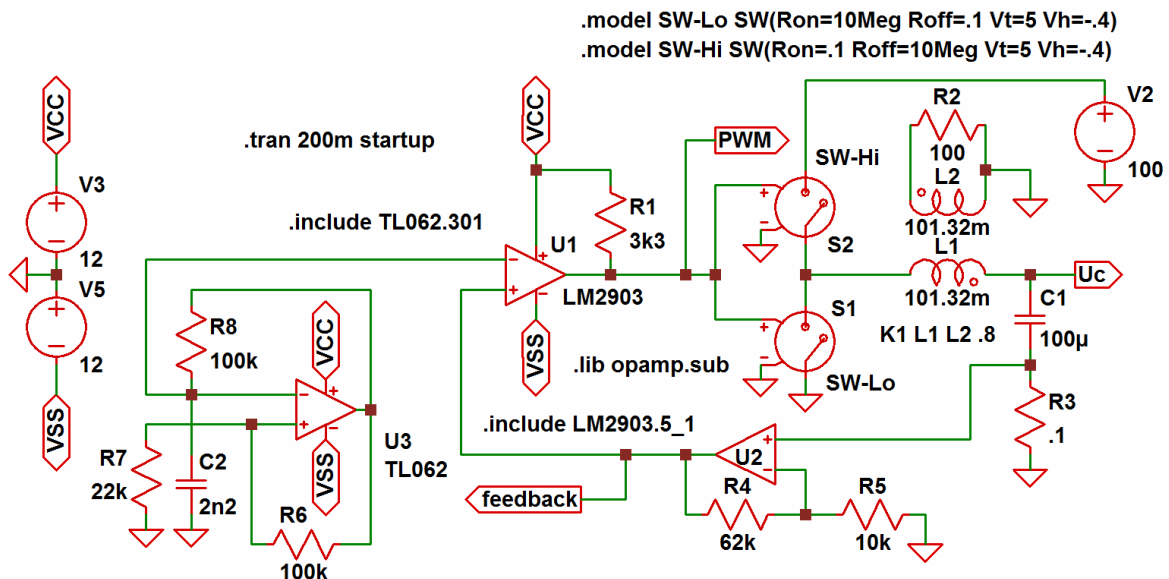
Jedná se o velmi přesný generátor, který je pro naše účely zbytečně luxusní. Pokud požadujeme, aby amplituda kmitů byla malá v porovnání s napájecím napětím, můžeme zapojení na obr. 1 nahradit jednodušším řešením podle obr. 3, přičemž linearita bude pro naše účely dostatečná.



Obr. 3: Zjednodušené zapojení generátoru pily s jedním OZ

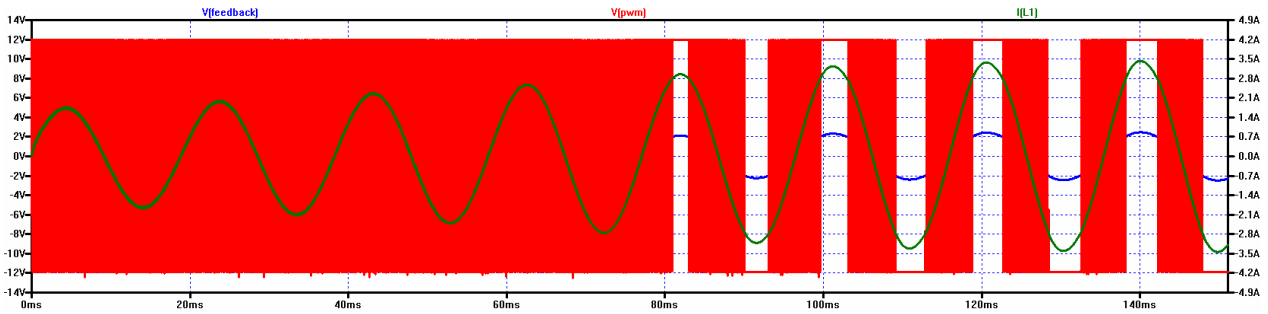


Obr. 4: Pilovitý průběh napětí na výstupu generátoru z obr. 3



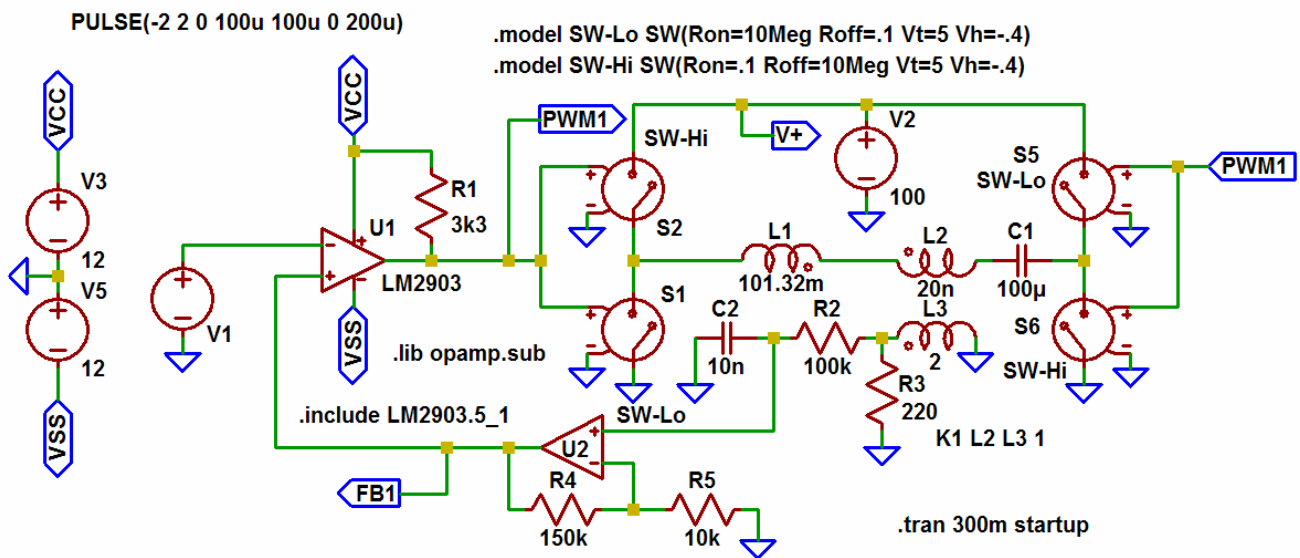
Obr. 5: Oscilátor se sériovým RLC obvodem a PWM

Na obr. 5 máme oscilátor s generátorem pily z obr. 3. Na obr. 6 se můžete přesvědčit, že tento oscilátor funguje stejně dobře jako oscilátor s ideálním generátorem pily. Druhý operační zesilovač v pouzdře obvodu TL062 můžeme použít jako zesilovač U2.

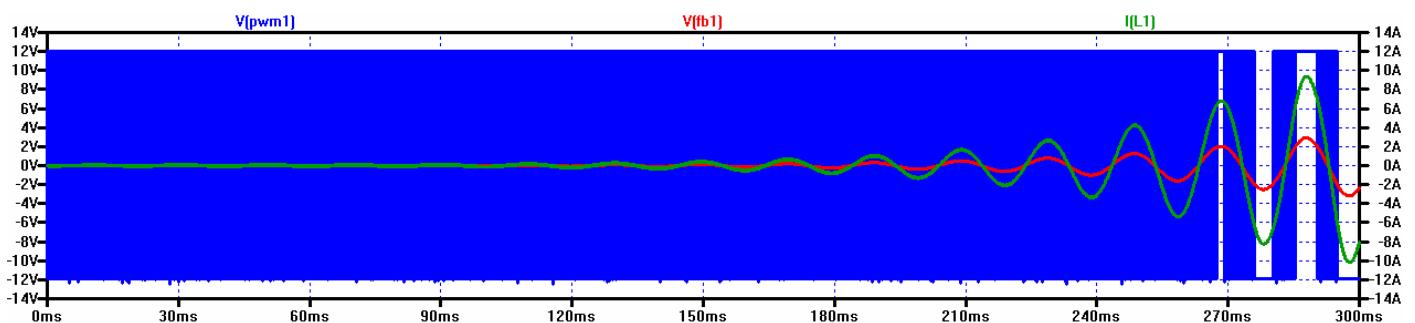


Obr. 6: Průběhy veličin v obvodu na obr. 5

Podobně můžeme vytvořit PWM oscilátor úplným H-můstkem. V tomto případě místo snímacího odporu R3 použijeme proudový transformátor. Na obr. 7 tento transformátor je tvořen cívkami L2, L3.

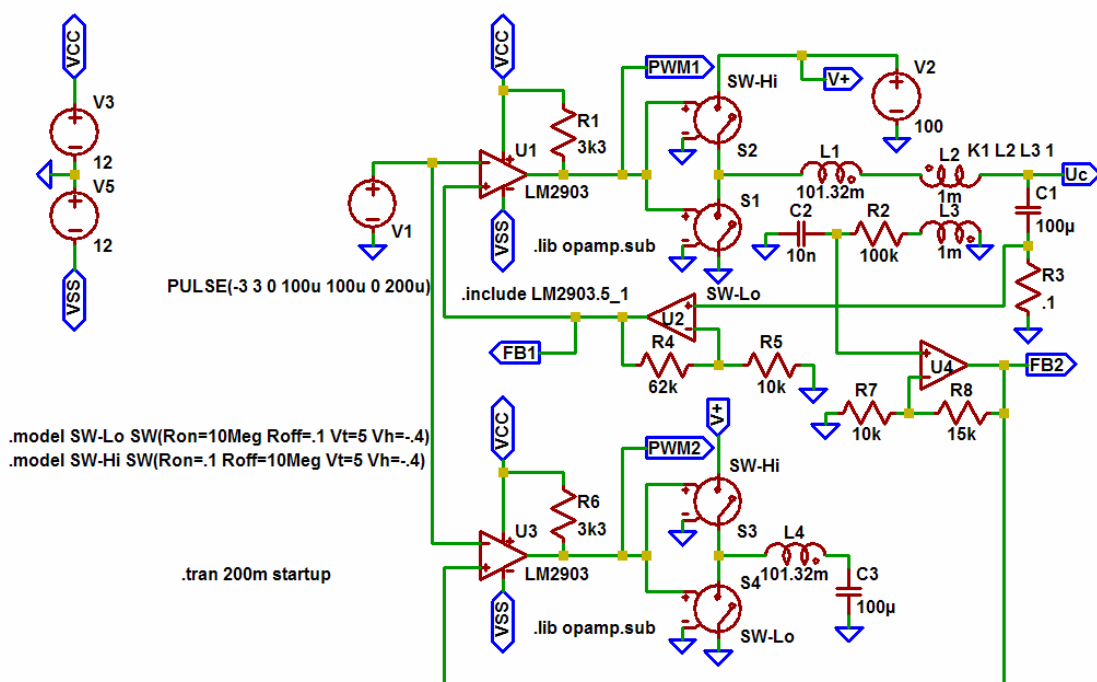


Obr. 7: PWM oscilátor s úplným H-můstkem

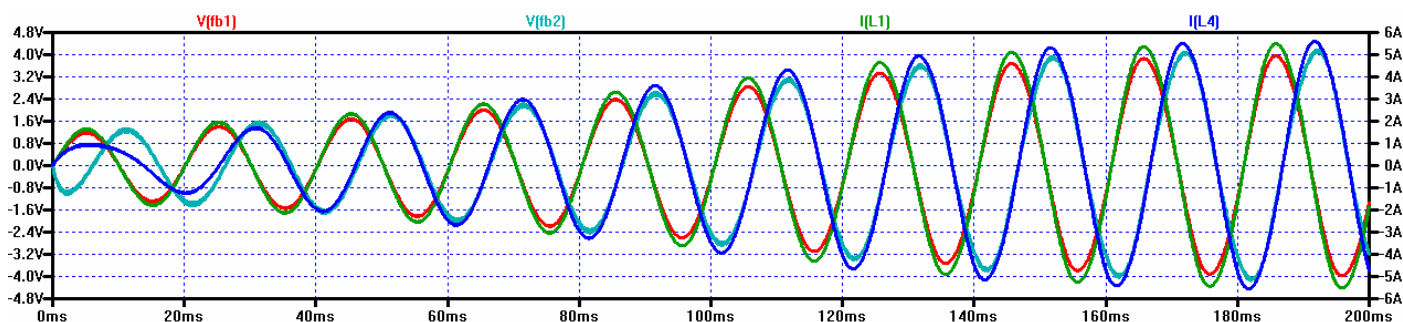


Obr. 8: Průběhy veličin v obvodu na obr. 7

Pokud bychom chtěli rezonančně řídit dvoufázový motor, museli bychom nějak zajistit sinusový signál fázově posunutý o  $90^\circ$ . To se dá zařídit poměrně jednoduše pomocí transformátoru, kde primární cívka je zapojena do série s RLC obvodem oscilátoru a sekundární cívka není zatížena rezistorem. V tomto případě je mezi proudem primáru a napětím sekundáru fázový posun právě  $90^\circ$ . Protože proud oscilátorem není díky šířkové modulaci úplně sinusový, musíme na výstupu transformátoru použít filtr. Pro tento účel postačí obyčejný RC filtr. Raději zvolíme větší odpor a menší kapacitu, abychom příliš nezatěžovali transformátor a nezpůsobili tak příliš velkou odchylku od požadovaného fázového posunu. Na dalším obrázku máme příklad rezonančního řízení dvoufázového motoru v půlmůstkovém zapojení:



Obr. 9: Rezonanční řízení PWM dvoufázového motoru – polomost

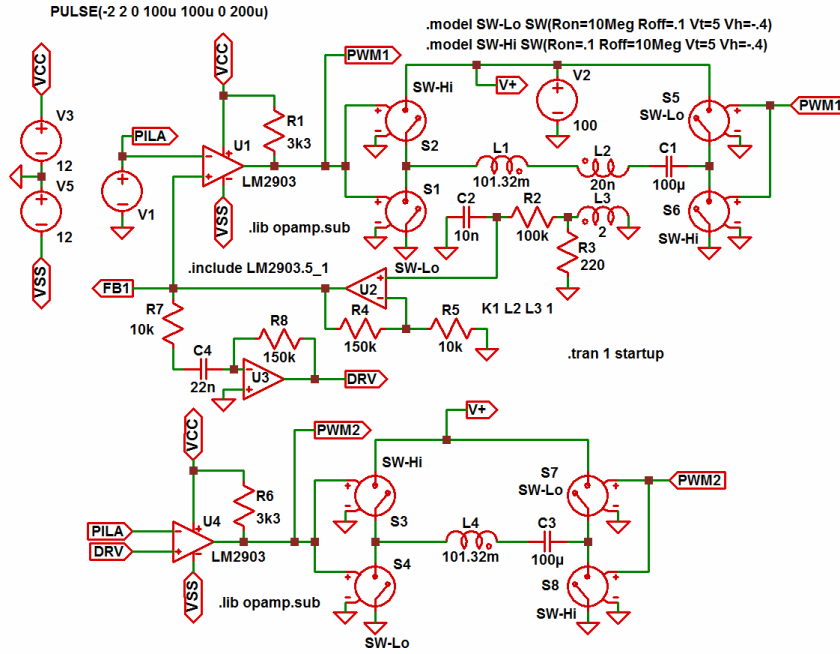


Obr. 10: Průběhy veličin v obvodu na obr. 9

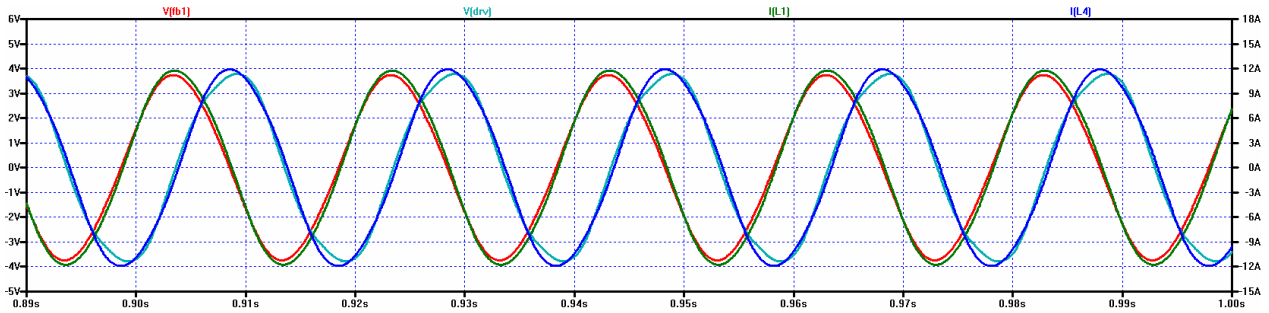
Zesílení obou zesilovačů musíme zvolit tak, aby oba signály FB1 a FB2 měly stejnou amplitudu, která by zhruba měla odpovídat amplitudě pilovitého průběhu zdroje V1.

Poměrně snadno můžeme rezonančně s PWM řídit dvoufázový motor se dvěma H-můstky, jak ukazuje obr. 11. V tomto případě jsme fázový posun o  $90^\circ$  zajistili pomocí derivačního zesilovače s operačním zesilovačem U3. Na obr. 12 jsou průběhy proudů fází a řídicích napětí přivedených na vstupy komparátorů U1 a U4. Zdroj pily (V1) je pro oba komparátory společný. Změnou amplitudy pilových kmitů můžeme řídit proud resp. výkon motoru. Čím větší amplituda pilových kmitů v porovnání se sinusovým signálem, tím menší výkon a naopak. Názorně si to ukážeme na obr. 13. Zde máme sériový RLC obvod zapojený do diagonály můstku složeného ze čtyř spínačů S1 – S4. Tyto spínače jsou řízeny PWM signálem, který je vytvářen komparátorem U1, zdrojem pilových kmitů V4, zdrojem sinusového signálu V1 a řízeným děličem napětí. Dělič napětí je tvořen odpory R3, R4 a speciálním optočlenem Vactrol VTL5C2. Vactrol je obchodní značka optočlenů s LED diodou a fotoodporem firmy Vactrec, Inc.

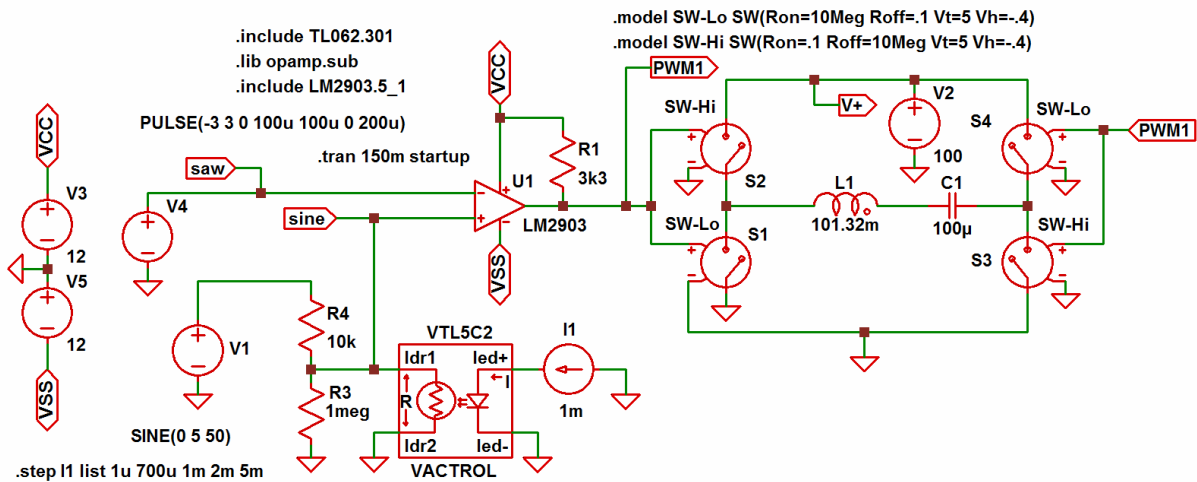
([https://en.wikipedia.org/wiki/Resistive\\_opto-isolator](https://en.wikipedia.org/wiki/Resistive_opto-isolator)). Pro ruční regulaci proudu bychom si vystačili s obyčejným potenciometrem, avšak toto řešení bylo zvoleno pro možnost řízení v uzavřené zpětnovazební smyčce. Na obr. 14 máme zobrazeny průběhy proudu RLC obvodem pro různé hodnoty řídicího proudu ze zdroje I1:  $1\mu\text{A}$ ,  $700\mu\text{A}$ ,  $1\text{mA}$ ,  $2\text{mA}$  a  $5\text{mA}$ .



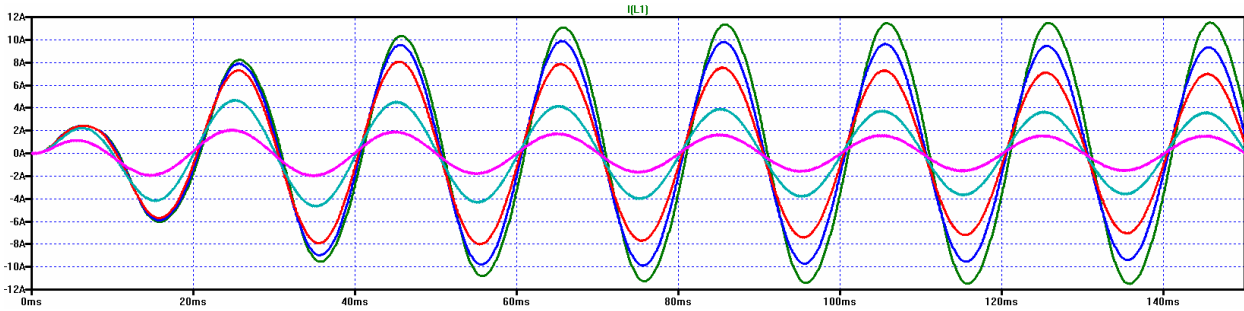
Obr. 11: Rezonanční řízení PWM dvoufázového motoru – celomost



Obr. 12: Průběhy veličin v obvodu na obr. 11

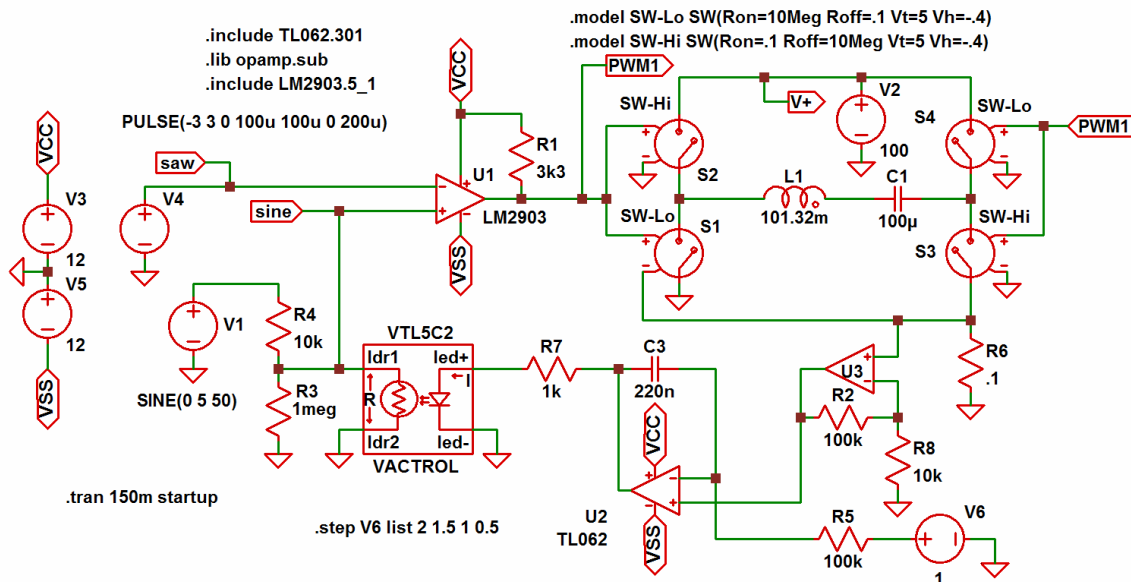


Obr. 13: Regulace proudu rezonančním obvodem s PWM

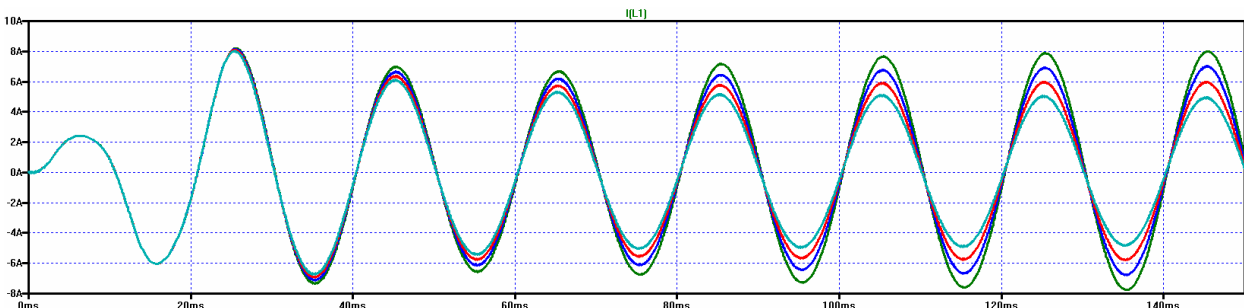


Obr. 14: Průběhy proudu v RLC obvodu na obr. 13 pro různé hodnoty proudu zdroje I1

*Poznámka:* Hlubavý čtenář si může položit otázku, proč jsme se rozhodli řídit signál sinusový a ne pilový. Důvodem je vlastnost optočlenů Vactrol. Jsou totiž velmi pomalé. Mimochodem, z tohoto důvodu byly vytlačeny rychlejšími optočleny typu LED – fototranzistor a dalšími typy téměř ve všech oblastech techniky a udržely se pouze ve speciálních aplikacích, jako jsou kytarové zesilovače nebo analogové syntezátory.



Obr. 15: Regulace proudu rezonančním obvodem s PWM se zpětnovazební smyčkou

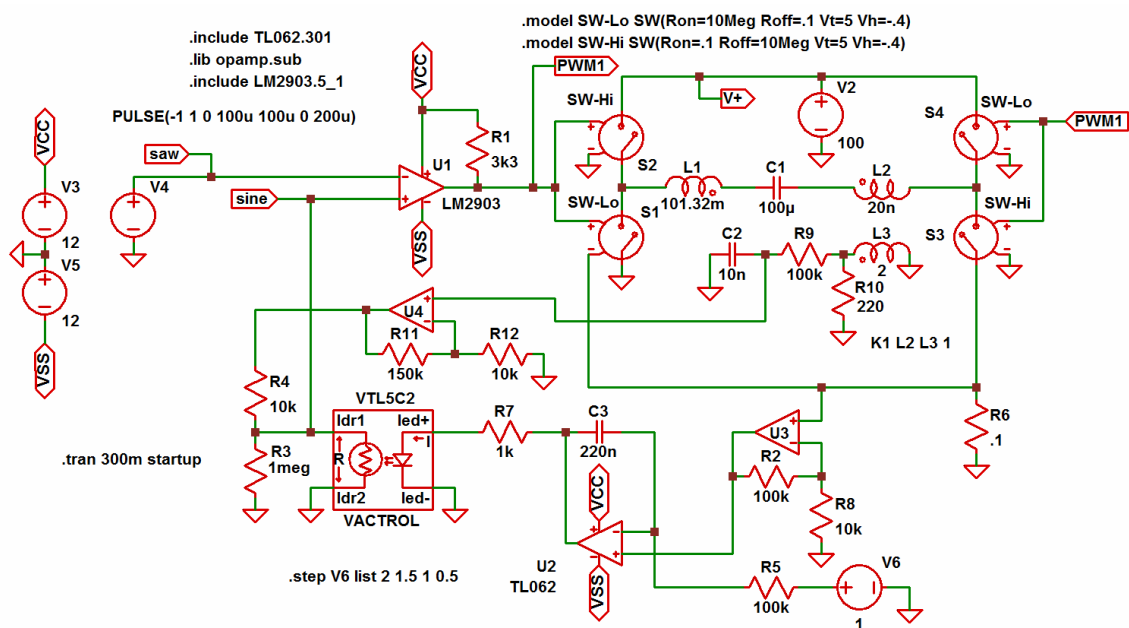


Obr. 16: Průběhy proudu v RLC obvodu na obr. 15 pro různé hodnoty napětí zdroje V6

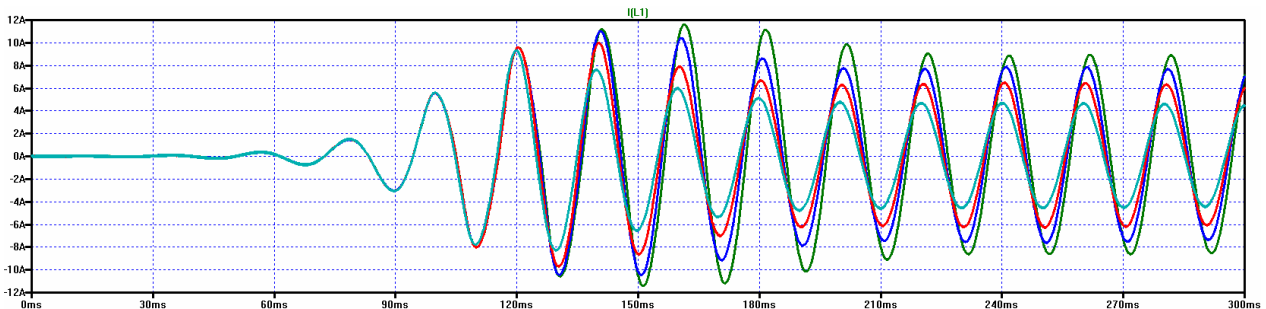
Obvod na obr. 13 představuje ruční regulaci proudu. Nyní tento obvod vylepšíme tak, že zavedeme zpětnou vazbu, která bude udržovat konstantní hodnotu amplitudy proudu pro různé vnější podmínky, mezi něž může patřit např. velikost napětí zdroje V2 nebo stupeň mechanického zatížení rezonančně řízeného motoru. Na obr. 15 vidíme, že zmizel zdroj proudu I1 a přibýly dva zesilovače U2 a U3 a snímací odpor R6. U3 je

předzesilovač, který zesiluje úbytek napětí na odporu R6, a U2 je integrátor, jenž filtruje průběh napětí, které odpovídá proudu procházejícímu RLC obvodem. Na obr. 16 potom najdete průběhy proudu RLC obvodem pro různé hodnoty referenčního napětí V6.

Dalším krokem bude nahrazení zdroje sinusového signálu V1 druhou zpětnou vazbou od proudu RLC obvodem, takže budeme mít oscilátor, který bude mít dvě zpětnovazební smyčky: první smyčka bude řídit frekvenci oscilátoru a udržovat RLC obvod v rezonanci, druhá smyčka bude řídit amplitudu kmitů. Na výsledné schéma se můžete podívat na obr. 17. Přibyl zde proudový transformátor (L2, L3), RC filtr a zesilovač U4, jehož výstup je připojen na dělič složený z odporů R3, R4 a optočlenu Vactrol. Dále jsme snížili amplitudu zdroje pily V4, aby oscilátor rychleji nabíhal. Na obr. 18 se můžete přesvědčit, že obě zpětnovazební smyčky skutečně fungují.



Obr. 17: Regulace proudu rezonančním obvodem s PWM se dvěma zpětnovazebními smyčkami



Obr. 18: Průběhy proudu v RLC obvodem na obr. 17 pro různé hodnoty napětí zdroje V6

Tento způsob regulace amplitudy funguje pěkně, ale pokud bychom chtěli rezonančně řídit vídefázový motor, museli bychom mít tolik optočlenů Vactrol, kolik by bylo fází. To by se sice dalo dobře zrealizovat, ale elegantnější řešení by bylo, kdyby se nám podařilo regulovat amplitudu pilového signálu. Přes Vactrol to nepůjde z důvodu, o němž jsme hovořili výše, proto zvolíme jiný způsob: budeme generátor pily napájet ze zvláštního zdroje, jehož napětí budeme řídit pomocí napětí.