

REZONANČNÍ MOTOR polopatě II

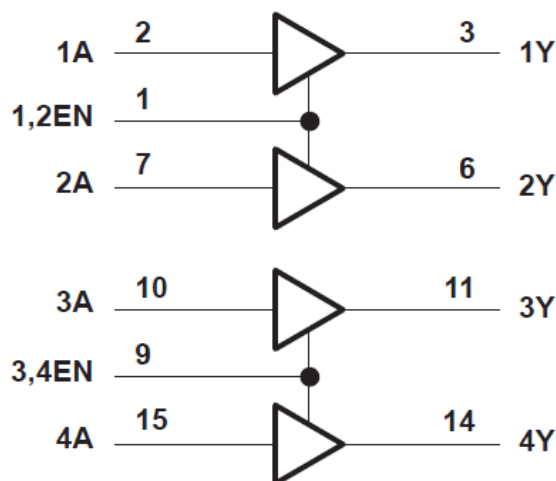
(c) Ing. Ladislav Kopecký, září 2015

V první části článku jsme probrali základy rezonančního řízení a skončili jsme příkladem rezonančního řízení dvoufázového motoru v půlmůstkovém zapojení. V tomto duchu budeme pokračovat, přičemž se zaměříme na obvodová řešení rezonančního řízení s konkrétními součástkami. Dlouho jsem se tomuto přístupu vyhýbal a raději jsem se pohyboval v obecnější rovině. Ukázalo se však, že málokdo má dostatek představivosti a odborných znalostí, aby dokázal tyto teoretické poznatky převést do praxe. Hlavním impulzem ke změně přístupu byla reakce společnosti Siemens, které jsem vynález rezonančního řízení nabídl k využití. Byl jsem odmítnut s odůvodněním, že rezonanční řízení je komplikované a drahé. Je tedy načase ukázat, že opak je pravdou.

Systém řízení dvoufázového motoru byl ověřen v praxi na dvoufázovém krokovém motoru a zprávu o tom najdete [zde](http://free-energy.xf.cz):

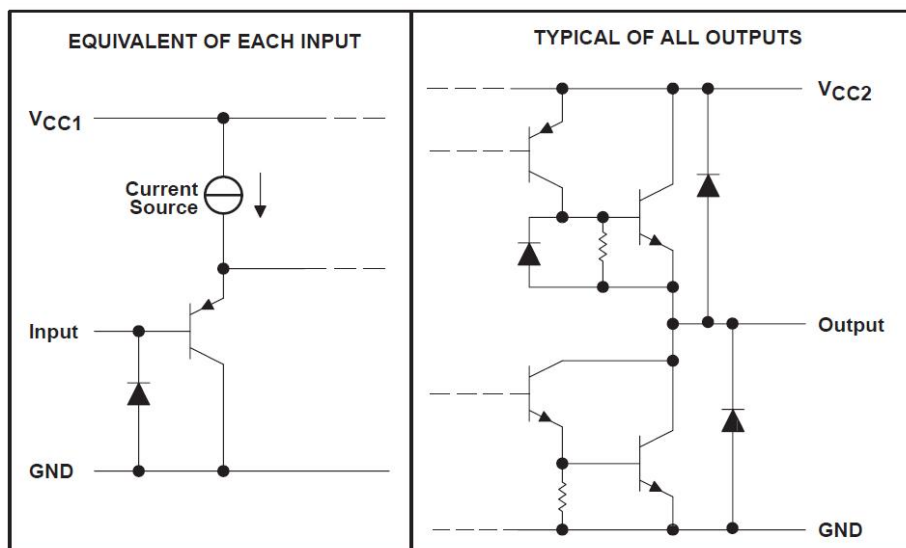
<http://free-energy.xf.cz/simulace/RZ-KM-PM.pdf>

Pro elektronické přepínače jsem použil integrovaný obvod L293D, který obsahuje dva úplné H-můstky a každý výstup je chráněn dvojicí diod. Protože jsem oba H-můstky nevyužil a obvod je proudově poddimenzován, zapojil jsem vždy dva přepínače paralelně. Logické schéma obvodu najdete na obr. 1. Na obr. 2 je zapojení jednoho vstupu a výstupu.

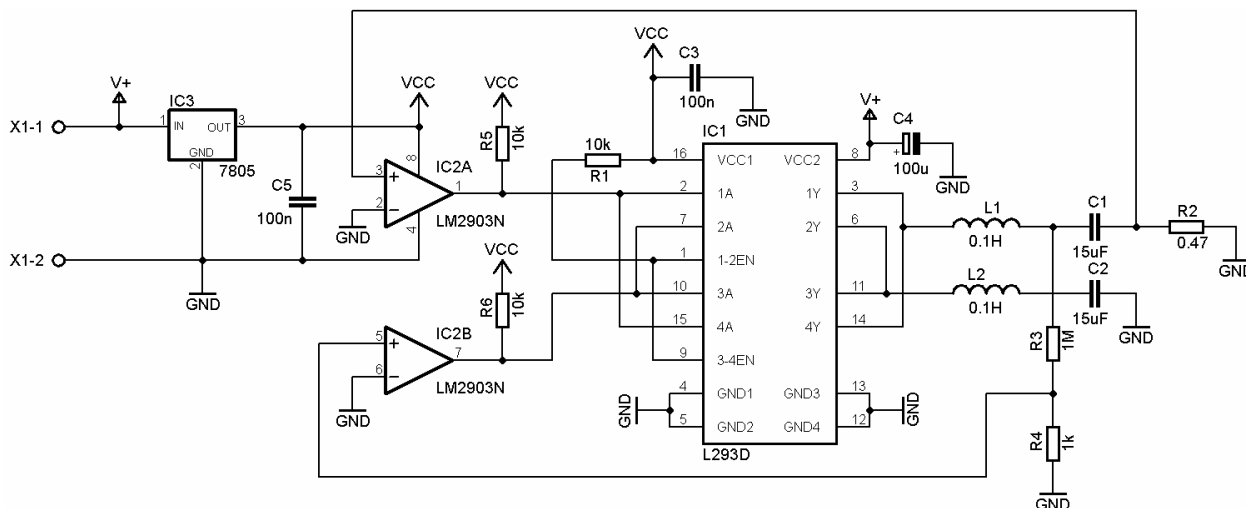


Obr. 1: Logické schéma obvodu L293

Schéma zapojení rezonančního řízení najdete na obr. 3. Na svorky X1 je přivedeno napětí 24V, které napájí výstupní obvody L293D. Pomocí lineárního stabilizátoru 7805 je vyrobeno 5V pro napájení řídicí části zapojení, tj. komparátory LM2903 a řídicí obvody L2903D. Indukčnosti L1 a L2 jsou vinutí krokového motoru a mají indukčnost cca 0,1H. Rezonanční kondenzátory C1 a C2 mají jmenovitou kapacitu 15 μ F. Proud vinutím je snímán pomocí odporu R2 a příslušný napěťový signál je přiveden na vstup (+) komparátoru IC2A. Napětí na kondenzátoru C1, jež je proti proudu fázově posunuto o 90°, je sníženo odporovým děličem na vhodnou úroveň a přivedeno na vstup (+) komparátoru IC2B. Tímto jednoduchým trikem jsme zajistili potřebný fázový posun pro řízení druhé fáze krokového motoru.



Obr. 2: Zapojení jednoho vstupu a výstupu obvodu L293D

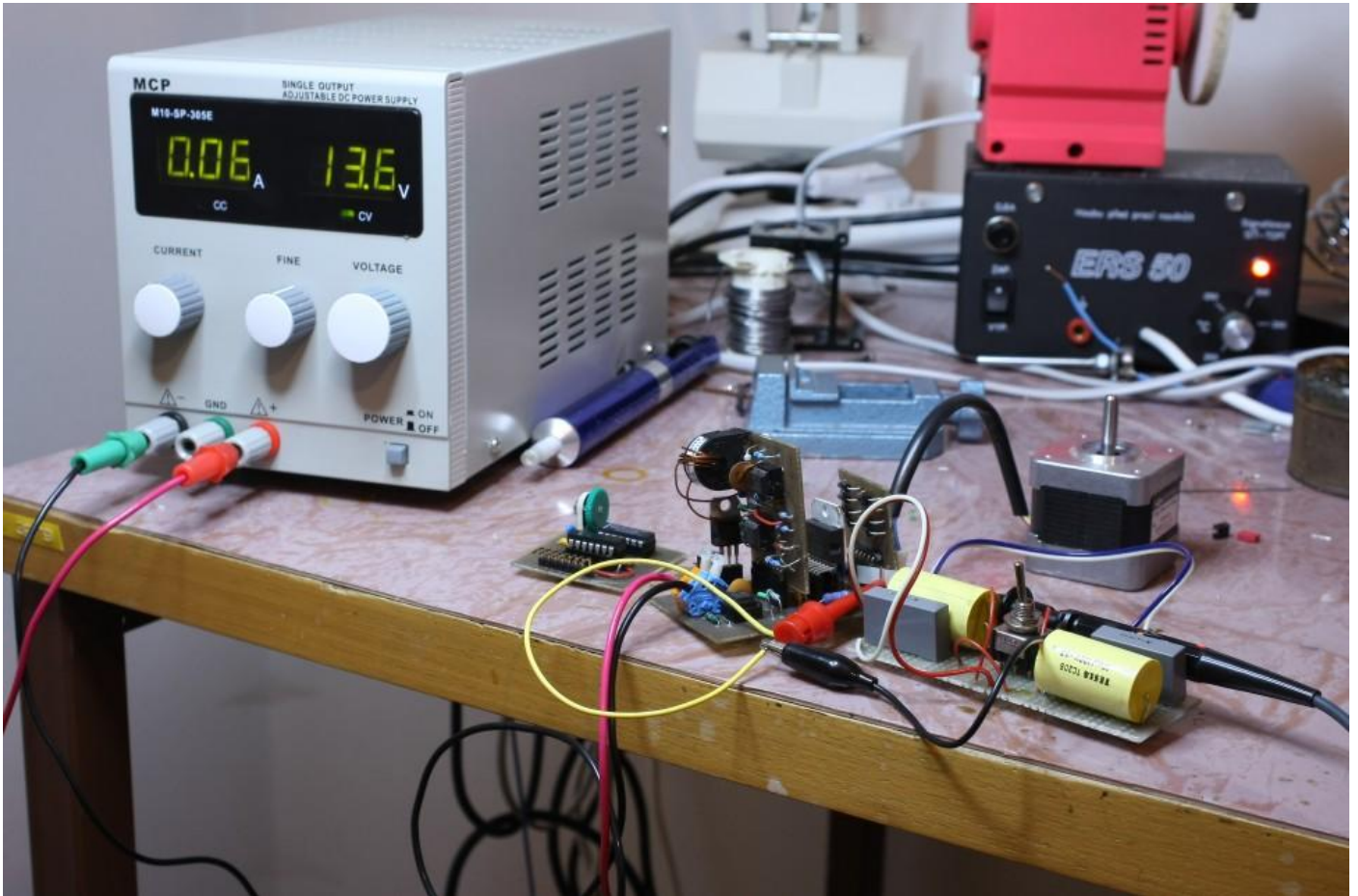


Obr. 3: Elektronika rezonačního řízení krokového motoru – půlmůstek

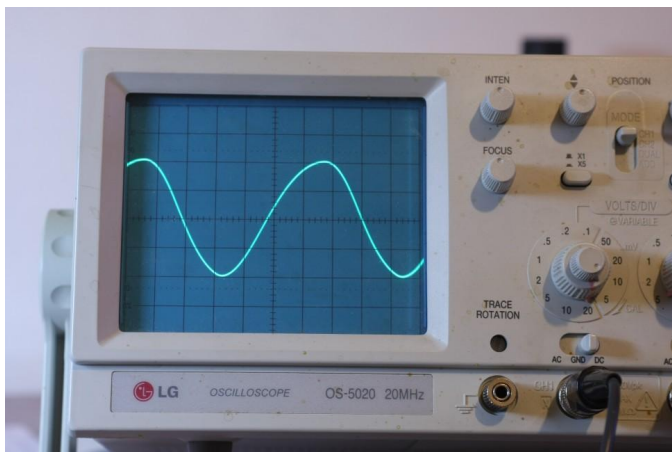
Poznámka: Může se zdát nelogické, že jsou spojeny kanály 1-4 a 2-3. Je to čistě z praktických důvodů kvůli návrhu plošného spoje.

Také jsem se zabýval rezonančním řízením tohoto krokového motoru v celomůstkové verzi. Zároveň jsem porovnával rezonanční řízení s běžným řízením pomocí logických obvodů. Ukázalo se, že bez zátěže jednoznačně rezonanční řízení vedlo. Výhoda rezonančního řízení se projevila především ve vysokých otáčkách. Avšak při nízkých otáčkách a při zátěži mělo navrch klasické řízení. O příčině jsme již psali: Běžný motor při mechanické zátěži má vyšší odběr proudu, zatímco u rezonančního řízení při zvýšené mechanické zátěži odběr klesá. Přesto má rezonanční řízení řadu předností: vysoká účinnost, jednoduchost, spolehlivost, hladký chod, nepůsobuje elmag. rušení a schopnost pracovat ve vysokých otáčkách. Než začneme zkoumat schémata zapojení, podíváme se na několik fotografií. Na obr. 4 je pohled na pracoviště s rezonančně řízeným krokovým motorem. Laboratorní zdroj ukazuje napětí 13,6V. V popředí vidíme základní desku (s červeným a černým napájecím vodičem), do níž je mj. vsunut řídicí modul s proudovým transformátorem. Vlevo od této desky leží modul pro klasické řízení pomocí logických obvodů (s trimrem se

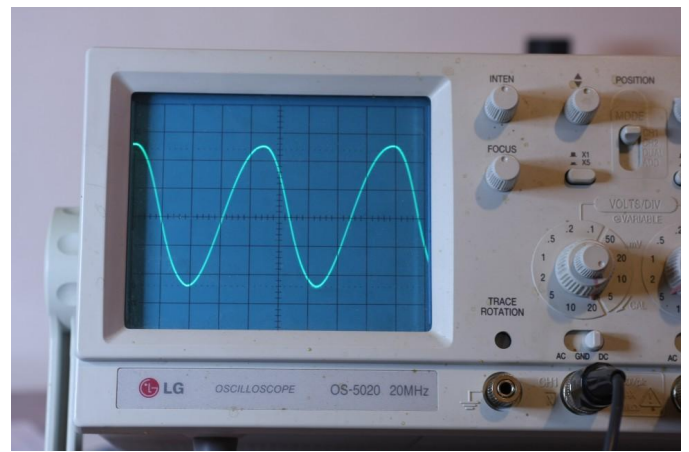
zeleným kolečkem), vpravo je deska s kondenzátory a přepínačem, který přepíná rezonanční kapacitu. Za deskami s elektronikou je řízený krokový motor.



obr. 4: Pohled na pracoviště s rezonančně řízeným krokovým motorem



$C = 10\mu\text{F}$

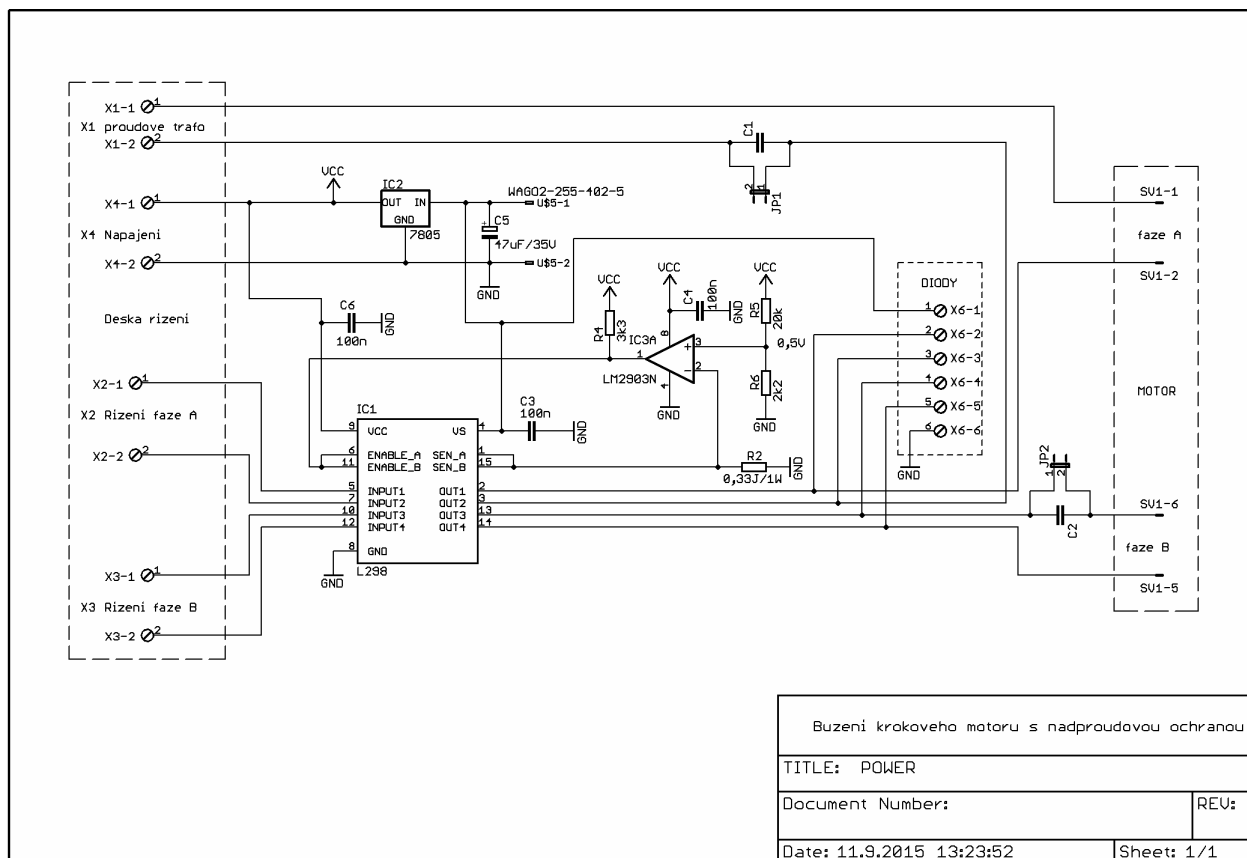


$C = 4,7\mu\text{F}$

Obr. 5: Průběhy napětí na rezonančním kondenzátoru

Na obr. 5 máme průběhy napětí na rezonančním kondenzátoru. Při kapacitě $10\mu\text{F}$ je amplituda 40V (při napájení 13,6V) a při kapacitě $4,7\mu\text{F}$ jednak stoupla frekvence, jednak se zvýšila amplituda napětí na kondenzátorech téměř o 10V.

Nyní již přejdeme k popisu zapojení elektroniky, kterou jsme viděli na obr. 4. Na obr. 6 máme základní desku s výkonovou částí elektroniky, vstupními napájecími svorkami, konektorem pro připojení krokového motoru a konektory pro dva zásuvné moduly.

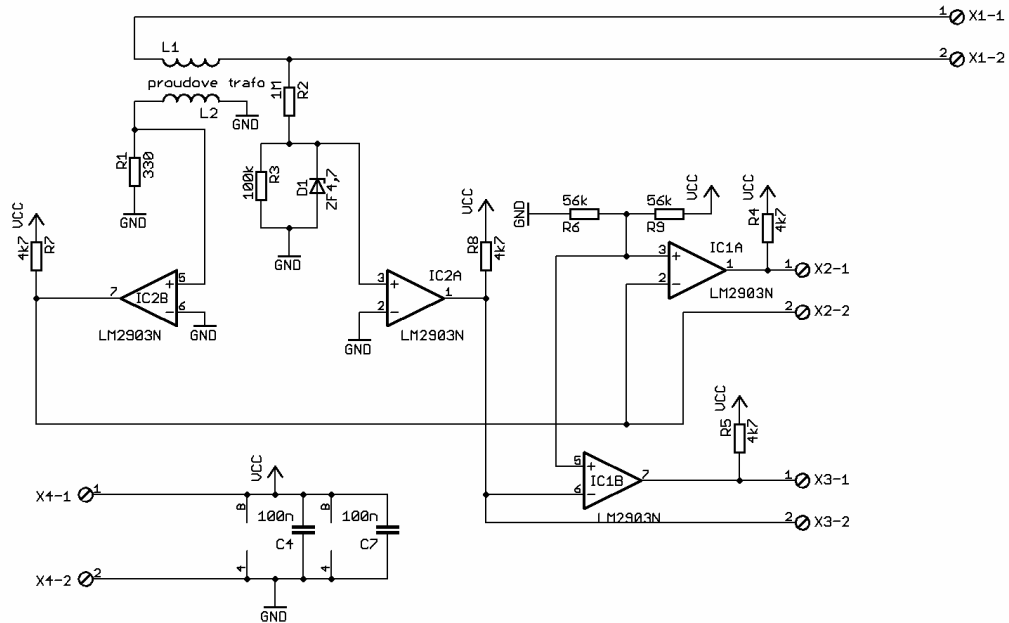


Obr. 6: Základní deska řídicí elektroniky krokového motoru

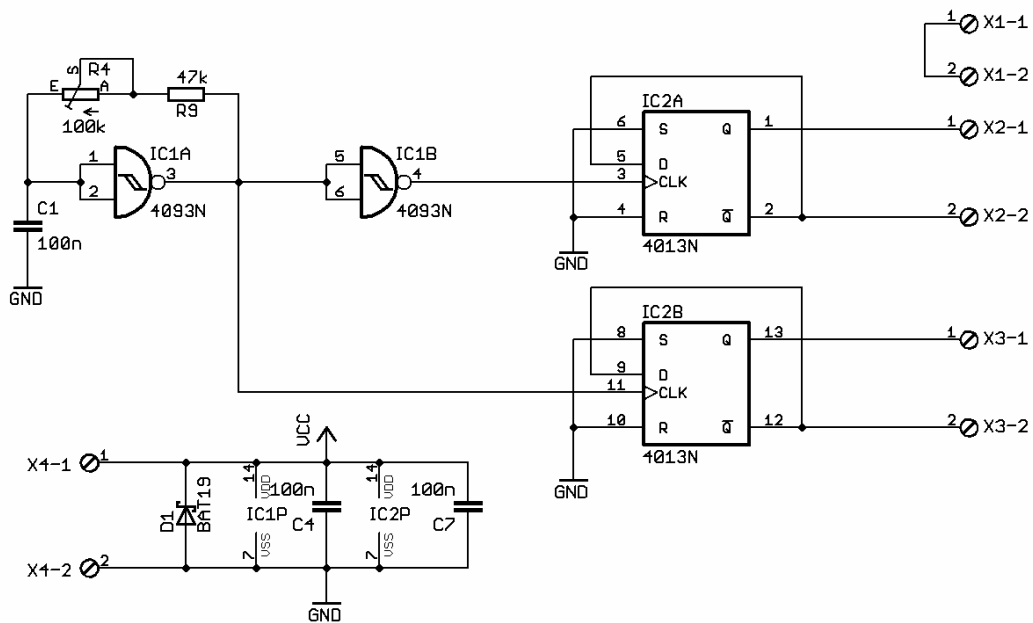
Nejdůležitějším prvkem desky je integrovaný obvod L298, který obsahuje dvě čtveřice výkonových spínačů zapojených do dvou H-můstků. Dále zde máme komparátor IC2A, jenž slouží jako ochrana před proudovým přetížením, lineární stabilizátor 7805, pár pasivních součástek a několik konektorů. Konektor vlevo slouží pro připojení desky s řídicí elektronikou. Vpravo je konektor pro připojení modulu s ochrannými diodami (uvnitř L298 diody nejsou) a konektor pro připojení krokového motoru.

Řídicí elektronika pro rezonanční řízení dvoufázového motoru na obr. 7 již byla vysvětlena v první části tohoto článku a je proto zbytečně, abychom její funkci vysvětlovali znovu. Jako inventory logického signálu jsou zde použity komparátory LM2903.

Na obr. 8 je elektronika logického řízení. Logický obvod 4093 má na vstupech Schmittovy klopné obvody, je proto vhodný pro vytvoření generátoru obdélníkového signálu. Klopný obvod 4013 je zapojený jako dělička dvěma. Funkci obvodu uvidíte názorně, až jej budeme simulovat. Dříve však budeme simulovat rezonanční řízení krokového motoru s úplným H-můstkem. Na obr. 9 máme nakreslen oscilátor se spínači zapojenými do H-můstku. Hodnoty cívky jsme zjistili změřením skutečného krokového motoru: indukčnost $L1 = 108,2\text{mH}$ a odpor vinutí je $R = 28,5\Omega$. Kapacita rezonačního kondenzátoru se mění: $10\mu\text{F}$, $4,7\mu\text{F}$ a $1\mu\text{F}$. Odpor $R1$ představuje ztráty vířivými proudy a je nastaven tak, aby amplituda napětí na $C1$ při simulaci odpovídala amplitudě zjištěné pomocí osciloskopu (viz obr. 5). Cívky $L2$, $L3$ tvoří proudový transformátor a hodnoty jejich indukčností byly odhadnuty. Velikost odporu $R2$ byla zvolena kompromisem mezi fázovým posunem a velikostí signálu.

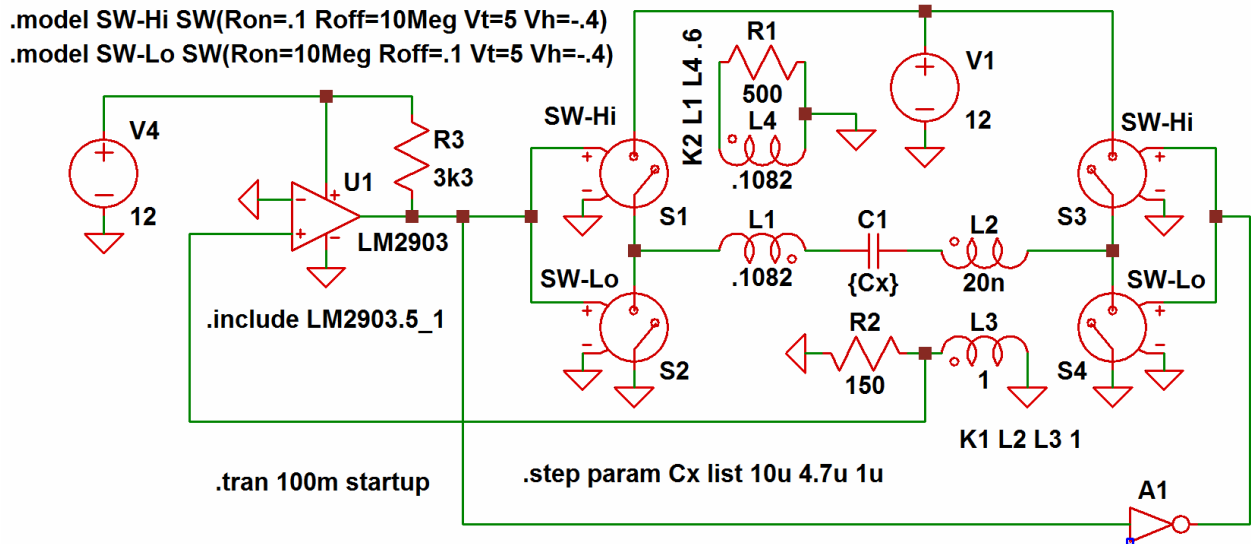


Obr. 7: Deska řídicí elektroniky pro rezonanční řízení

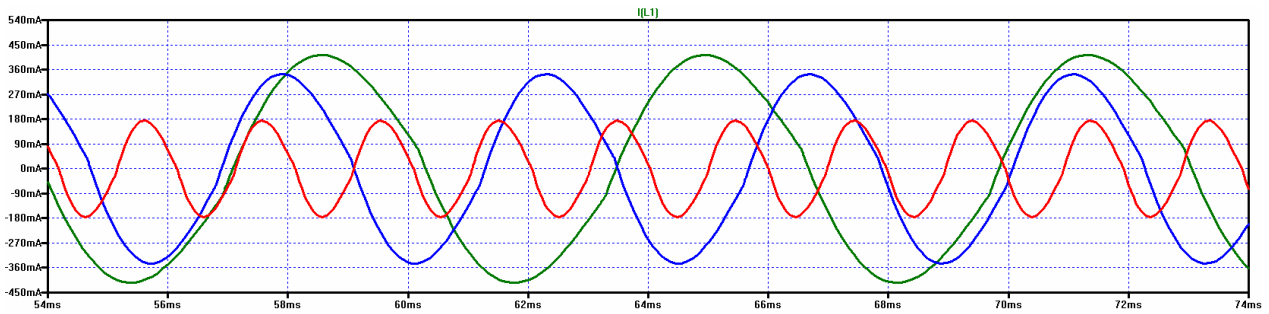


Obr. 8: Deska řídicí elektroniky pro logické řízení

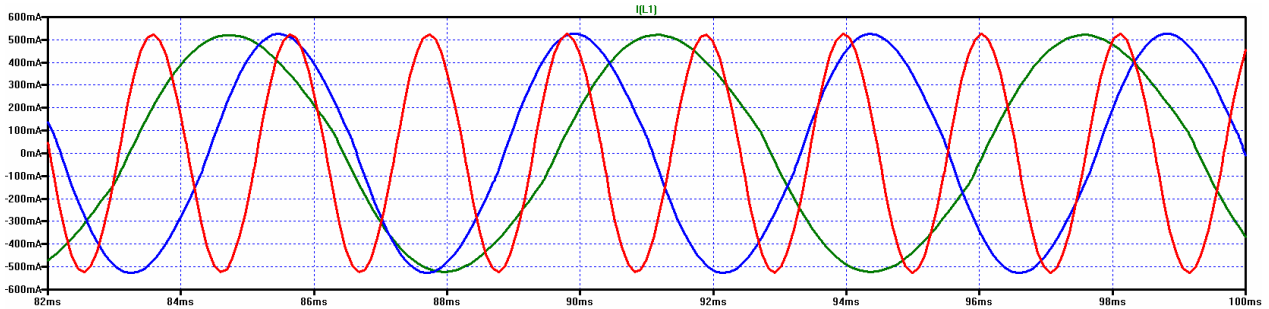
Když spustíme simulaci, vidíme (obr. 10), že proud s frekvencí klesá. Důvodem jsou vířivé proudy. Pro zajímavost vířivé proudy zrušíme a podíváme se, co to provede s proudem. Na obrázku 11 vidíme, že při $C1 = 10\mu\text{F}$ proud stoupl na více než $0,5\text{A}$ a s frekvencí neklesá. Toho bychom dosáhli tím, že bychom měli nějaký speciální magnetický materiál, který je dokonalý izolant a zároveň je schopen sycení jako běžné Si-plechy, tj více než 1T . To je bohužel nereálné. Ferit, který je izolant lze sytit pouze na hodnotu $0,4\text{T}$. Takže se ukazuje, že doménou rezonančních motorů jsou vysoké otáčky.



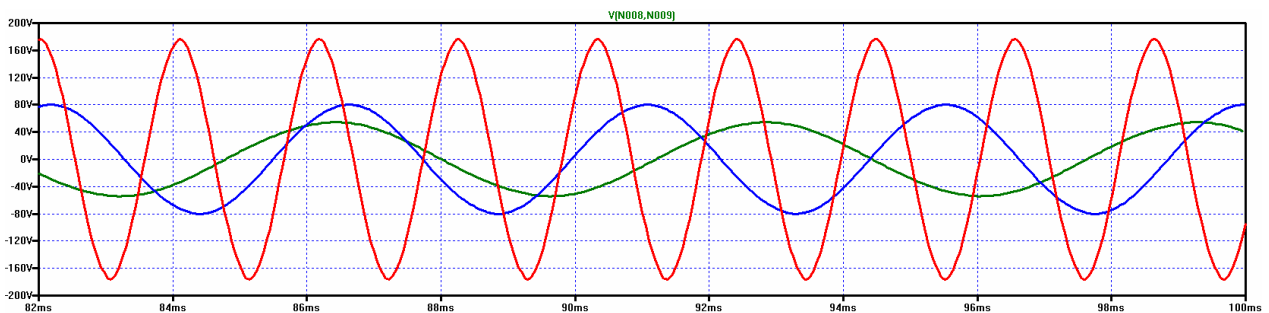
Obr. 9: Simulace rezonančního řízení jedné fáze krokového motoru – H-můstek



Obr. 10: Simulace proudu pro různé hodnoty C1 – vliv vířivých proudů



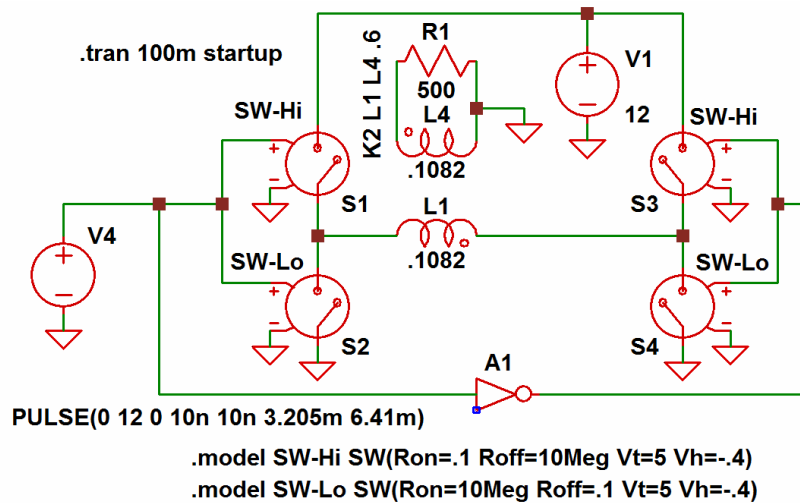
Obr. 11: Simulace proudu pro různé hodnoty C1 – bez vlivu vířivých proudů



Obr. 12: Simulace napětí na kondenzátoru pro různé hodnoty C1 – bez vlivu vířivých proudů

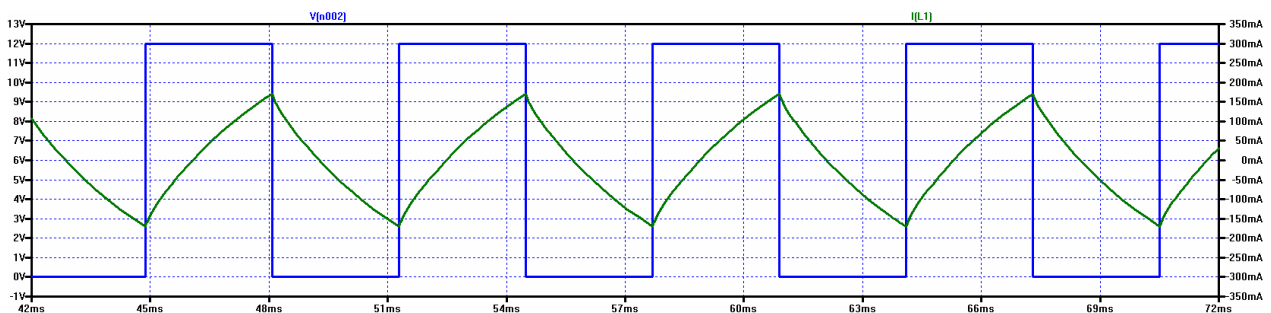
Nyní změříme frekvenci pro jednotlivé hodnoty rezonanční kapacity a zapíšeme do následující tabulky. Tuto tabulku použijeme pro simulaci logického řízení krokového motoru (obr. 13).

Rezonanční kapacita	10 μ F	4,7 μ F	1 μ F
Rezonanční frekvence	156Hz	225Hz	488Hz
Perioda	6,41ms	4,44ms	2,05ms



Obr. 13: Simulace logického řízení krokového motoru

Na obr. 13 máme simulaci řízení jedné fáze krokového motoru signálem obdélíkového průběhu. Je zde nastavena frekvence 156Hz, která odpovídá rezonanční kapacitě 10 μ F při rezonančním řízení. Průběh proudu a řídicího signálu pro tuto frekvenci najdete na obr. 14.



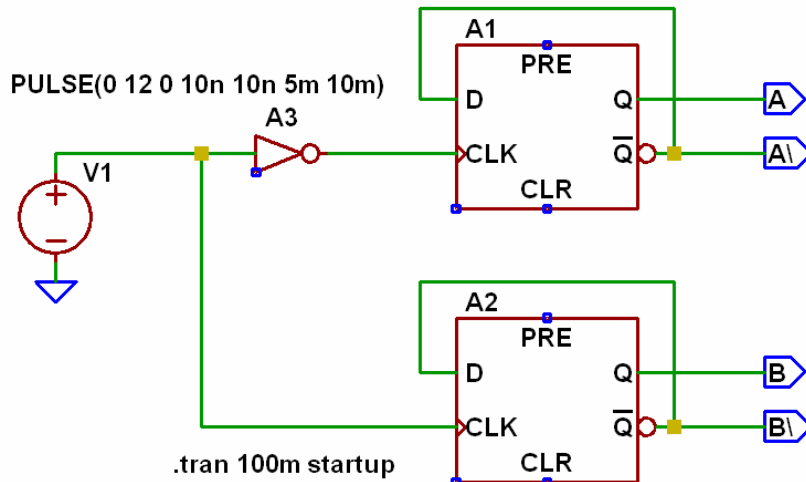
Obr. 14: Průběh proudu a řídicího napětí v obvodu na obr. 13

Nyní změříme amplitudy proudu jak u rezonančního řízení na obr. 9, tak u řízení podle obr. 13 pro 3 různé kapacity resp. frekvence a zapíšeme do následující tabulky. Z tabulky níže je jasně vidět, že s frekvencí sice při obou způsobech řízení proud klesá, ale u logického řízení jsou hodnoty amplitudy proudu podstatně nižší.

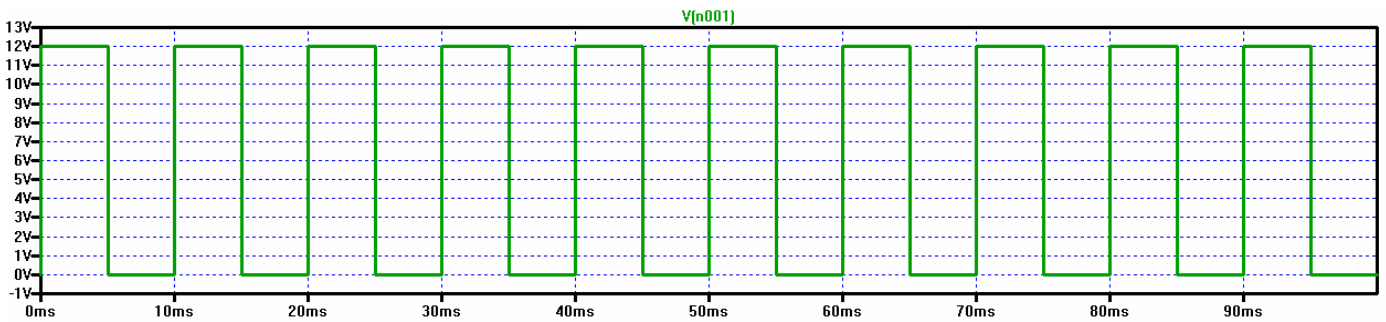
Rezonanční kapacita	10 μ F	4,7 μ F	1 μ F
Rezonanční frekvence	156Hz	225Hz	488Hz

Amplituda proudu rez.	412,7mA	343,0mA	173,7mA
Amplituda proudu log.	169,5mA	123,0mA	62,5mA

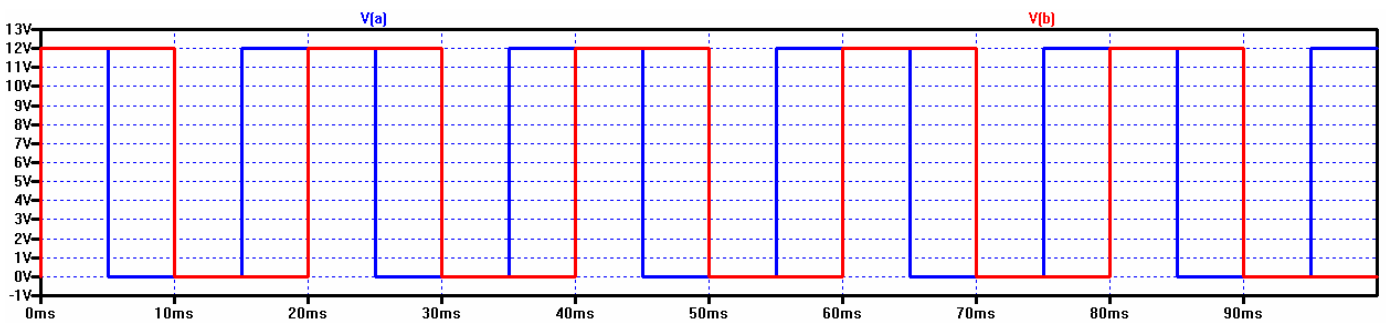
Na obr. 8 je schéma zapojení logiky řízení krokového motoru. Nyní tento obvod ověříme pomocí simulace. Generátor s hradlem IC1A pro jednoduchost nahradíme zdrojem impulzů. Obvod na obr. 15 je opravdu jednoduchý.



Obr. 15: Sekvencer pro řízení dvoufázového krokového motoru



a) hodinový signál ze zdroje V1



b) průběhy fází A a B

Obr. 16: Průběhy vstupu a výstupů sekvenceru

Tím jsme téma druhé části článku téměř vyčerpali. Volba padla na krokový motor z toho důvodu, že byl momentálně dostupný a snadno se na něm dají ověřit principy, které fungují i na větších strojích. Tak jako se tady projevily výhody rezonančního řízení, projeví by se stejně u jiného typu motoru. Krokový motor řízený pouze logickými obvody běžel nepravidelně, hlučně, s menším proudem při daném napětí a byl zdrojem elektromagnetického rušení. Naproti tomu rezonančně řízený motor běžel klidně, pravidelně, tiše si vrněl a neprodukoval prakticky žádné elmag. rušení. Složitost, resp. jednoduchost, obou řešení je obdobná. Zákon rezonance je jedním ze základních principů, na nichž funguje příroda. Rozšířením používání rezonančních motorů nejen ušetříme náklady na energii a životní prostředí, ale také se přiblížíme k přirozenému řádu světa, který je naší technikou stále více narušován. Měli bychom vyvíjet taková zařízení, která jsou v souladu s přírodou, jako to dělal například Viktor Schaubberger. Věřím, že rezonanční motor takovým zařízením je.

Nakonec se ještě vrátím k vyjádření Siemensu, že rezonační řízení je v porovnání elektronikou klasických motorů s elektronickou komutací (BLDC) drahé. Porovnávat rezonanční motory s BLDC motory je relevantní, neboť v obou případech je napájení ze stejnosměrného zdroje napětí. Připomenu, že mým hlavním argumentem pro používání rezonančních motorů je náhrada stejnosměrných komutátorových a BLDC motorů rezonančními motory, což přinese úspory energie, sníží úroveň elektromagnetického smogu, zvýší životnost a spolehlivost a zajistí bezúdržbovost motoru (v porovnání s komutátorovými motory).

Chceme-li se dobrat pravdy o skutečných nákladech na jednotlivé druhy elektrických pohonů, musíme brát v úvahu jak ceny vlastních motorů, tak cenu elektroniky pro jejich řízení. Nejdříve budeme srovnávat výrobní náklady vlastních motorů, které budeme používat pro napájení stejnosměrným proudem, ať už s nějakou elektronikou nebo bez ní (komutátorové motory). Potom budeme srovnávat složitost elektroniky pro jejich řízení.

Porovnáme-li výrobní náklady komutátorového motoru s náklady na výrobu indukčního motoru, zjistíme, že výrobní náklady jsou u komutátorového motoru vyšší, neboť vyrobit vinutou kotvu s komutátorem je složitější a dražší než vyrobit rotor indukčního motoru (kotva nakrátko), kde se v podstatě jedná o operaci vstříknutí hliníku do drážek rotoru. Výrobní náklady BLDC motoru jsou srovnatelné s výrobními náklady synchronního motoru s permanentními magnety. Při použití magnetů na bázi vzácných zemin (nejčastěji se používá neodym nebo samarium) je cena obou typů motorů výrazně vyšší než cena indukčního motoru s kotvou nakrátko.

Nyní porovnáme elektroniku motoru s elektronickou komutací s elektronikou rezonančního motoru. Jak už bylo uvedeno výše, pro rezonanční řízení dvoufázového motoru v půlmůstkovém zapojení potřebujeme dvě dvojice spínačů, zatímco pro řízení BLDC motoru potřebujeme tři. Pokud jde o řízení těchto spínačů, u rezonančního řízení si vystačíme s komparátorem (LM2903 má v jednom pozdě dva) v ceně cca 5Kč, zatímco pro řízení BLDC motoru potřebujeme mikrokontrolér v ceně minimálně o řád vyšší. Pokud bychom chtěli rezonančně řídit trojfázový motor, potřebovali bychom 3 dvojice spínačů jako v případě BLDC motoru. Elektronika rezonančního řízení by byla podobná jako u řízení dvoufázového motoru. Jediný rozdíl by byl v zajištění fázového posunu o 120°. Pokud bychom se spokojili s pevnými otáčkami, pro fázové posuny bychom použili dva obyčejné RC členy a dva komparátory (čili jeden integrovaný obvod LM2903). Při řízení otáček přepínáním rezonančních kapacit bychom použili mikrokontrolér, ale ten by mohl být velmi malý a levný, protože jeho jediným úkolem by bylo zajistit fázové posuny dvou fází. (Algoritmus by prováděl měření délky periody oscilátoru, jenž by obsahoval vinutí první fáze, a zajišťoval by časování přepínání dvou dvojic elektronických přepínačů.)

Pokud bychom chtěli rezonanční řízení použít jako náhradu frekvenčního měniče s jemným řízením otáček potřebovali bychom pro každou fázi sadu kondenzátorů s různě velkými kapacitami a sadu spínačů. Například pro získání patnácti stupňů otáček bychom potřebovali 4 kondenzátory a čtyři spínače. Kondenzátory by měly hodnoty odstupňované tak, abychom kombinacemi sepnutí jednotlivých spínačů získali souvislou řadu kapacit. Budeme-li například mít kondenzátory o kapacitách 1, 2, 4 a $8\mu\text{F}$, výsledná kapacita bude v rozmezí od $1\mu\text{F}$ do $15\mu\text{F}$. V tomto případě by se rezonanční řízení mohlo prodražit díky ceně kondenzátorů a spínačů, ale existuje mnoho aplikací, kde si vystačíme s konstantními otáčkami, případně se dvěma či třemi stupni otáček. V těchto případech vyjde rezonanční řízení levněji než pomocí BLDC motorů.

Moje představa o uplatnění rezonančního řízení je následující. V současné době zažívají boom ostrovní fotovoltaické elektrárny. Stále více domácností už nechce platit distributorům elektřiny a raději volí nezávislost na dodavateli elektřiny. Jedná se však o velmi nákladnou záležitost s dlouhou dobou návratnosti investice. Vedle ceny FV panelů a baterií musí zaplatit i trojfázový střídač, který ve verzi pro ostrovní systémy stojí cca 60 tisíc Kč. Přitom pro většinu spotřebičů je zbytečný. Počítače, televize, světelné zdroje a další spotřebiče mohou fungovat na stejnosměrný proud. Střídavý proud potřebují pouze spotřebiče, které používají střídavý elektromotor, ale těch není mnoho. Jsou to především ledničky, myčky na nádobí, pračky, čerpadla apod. Kdybychom u každého z těchto spotřebičů měli levnou elektroniku, nemuseli bychom střídavý proud vůbec používat. Jednou stejně přijde doba, kdy centralizované dodávky střídavého proudu budou nahrazeny stejnosměrnými lokálními autonomními zdroji elektrické energie. Rezananční řízení může tento vývoj urychlit.

Další oblastí využití rezonančního řízení je automobilový průmysl. V automobilu jsou pohony se stejnosměrnými motory např. pro ovládání stěračů, stahování oken, různých čerpadel, atd. Zde připadá v úvahu použití komutátorových nebo BLDC motorů. Tyto motory bychom mohli nahradit dvoufázovými indukčními motory s kotvou nakrátko řízenými rezonančně, což by vyšlo výrazně levněji, jak jsme ukázali výše.