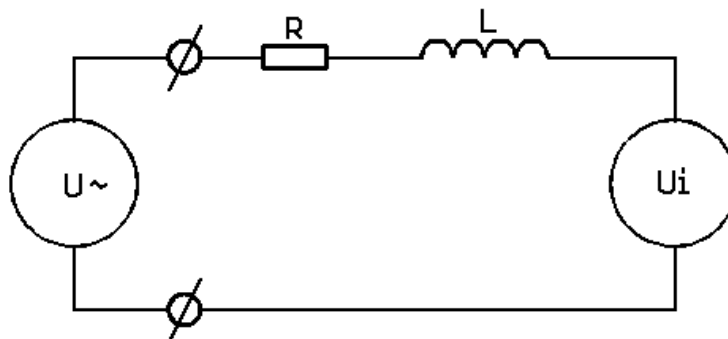


# PROJEKT

## Rezonanční motor

### Základní principy

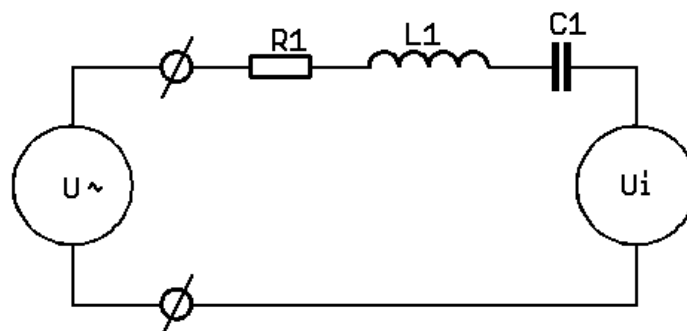
Elektrický střídavý motor libovolného druhu (např. indukční nebo synchronní) – resp. jednu jeho fázi – můžeme z hlediska elektrických ztrát nahradit elektrickým obvodem zobrazeným na obr.1.



Obr. 1. Náhradní schéma střídavého motoru z hlediska ztrát

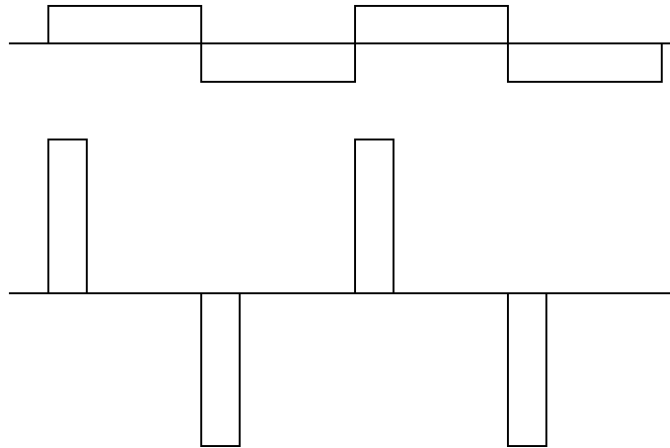
Rezistor představuje všechny činné ztráty, jako např. činný odpor vinutí nebo ztráty v magnetickém obvodu, zdroj napětí  $U_i$  je střídavý a v nejhorším případě je vůči napájecímu napětí  $U_{\sim}$  v protifázi. Napětí  $U_i$  vzniká například pohybem magnetického pole rotoru vůči statorovému vinutí. Cívka  $L$  představuje reaktanční ztráty, které závisí na frekvenci napájecího zdroje a indukčnosti cívky  $L$ . Činné ztráty lze omezit volbou materiálu mag. obvodu a průřezu vinutí. Zbylé dva zdroje elektrických ztrát u konvenčních elektromotorů odstranit dost dobře nejde.

Jestliže však do obvodu na obr. 1 zařadíme do série kondenzátor a zvolíme takovou frekvenci napájecího napětí, aby byla splněna podmínka rezonance (viz Thompsonův vzorec), lze vliv reaktance na ztráty v motoru eliminovat (viz obr. 2).



Obr. 2. Princip rezonančního motoru

Když zdroj střídavého napětí, pro jednoduchost např. obdélníkového průběhu, nahradíme zdrojem krátkých napěťových impulzů o relativně vysokém napětí tak, aby spotřebovaná energie v rámci jedné periody zůstala v obou případech stejná, potom i vliv indukovaného napětí  $U_i$  můžeme velmi významně omezit (viz obr. 3).

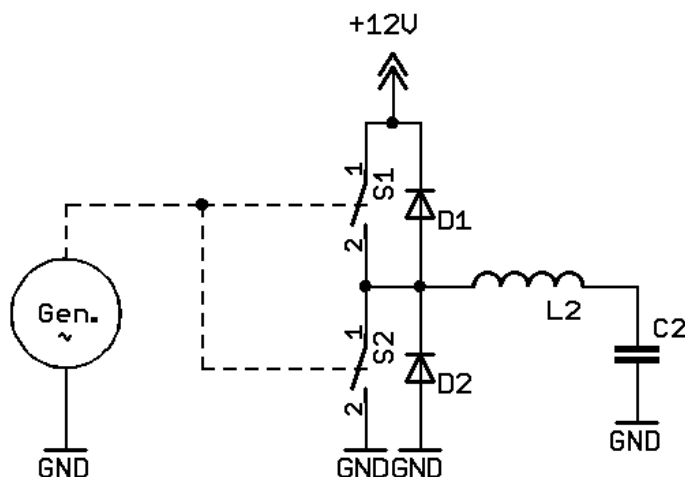


Obr. 3. Ilustrace k omezení vlivu indukovaného napětí  $U_i$

Ztráty ve střídavém elektromotoru jsou přímo úměrně závislé na frekvenci napájecího napětí, resp. otáčkách motoru. Z výše uvedeného je však patrné, že existují metody, jak tuto lineární závislost v určitém rozsahu otáček motoru omezit. Co to znamená? Důsledkem je, že v relativně širokém rozmezí otáček lze při konstantním příkonu zvyšovat výkon téměř v lineární závislosti na otáčkách. Stačí pouze, když dokážeme budicí cívku udržet v rezonanci při přepínání kapacit řady paralelně spojených kondenzátorů tak, aby klesala výsledná kapacita a rostl rezonanční kmitočet. Zařízení, které toto dokáže, existuje a byl na ně 20. března 2006 udělen patent číslo 296623. Patentované zařízení nese název „Zapojení pro rezonanční řízení jednofázového motoru“. Existují však i jiný způsob zajištění podmínky rezonance (resp. přiblížení se k ní), který bude popsán v následující části.

### **Realizace rezonančního motoru**

Je zřejmé, že při konstrukci rezonančního motoru je nutné co nejvíce omezit ztráty v magnetickém obvodu motoru. O vlivu materiálu jádra cívky na její činitel jakosti se můžeme přesvědčit jednoduchým pokusem, jehož princip je znázorněn na obr. 4.

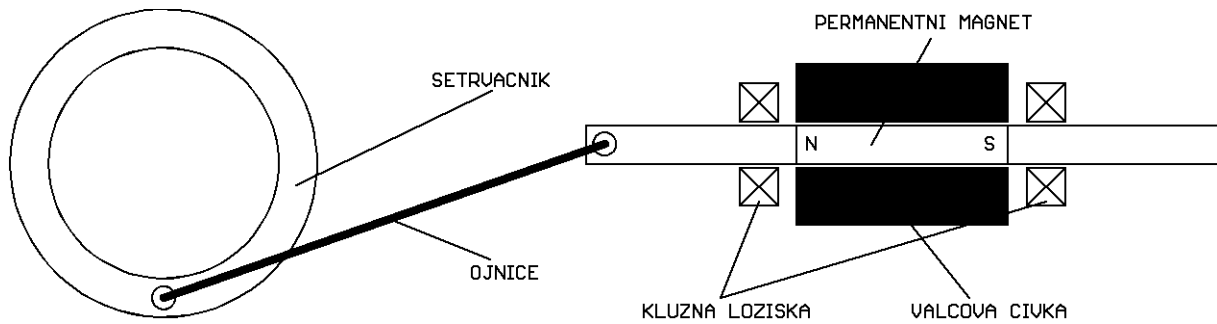


Obr. 4. Uspořádání experimentu se sériovou rezonancí

Generátor obdélníkového průběhu ovládá elektronický přepínač tvořený spínači S1, S2 a diodami D1, D2. Ten střídavě přepíná jeden konec cívky mezi stejnosměrným napájecím zdrojem a zemí. Jestliže napájecí napětí nepřekročí 15 V, můžeme jako spínače S1, S2 použít komplementární dvojici tranzistorů řízených polem (např. IRF9540 a IRF540). Vzhledem k velké kapacitě řídicí elektrody (kolem 1 nF) je žádoucí mezi generátor a spojené řídicí elektrody obou spínacích tranzistorů vložit vhodný budicí obvod (např. CMOS 4049, nebo 4050). Cívka je navinuta tak (např. na dutý válec nebo hranol), aby bylo možné do ní vkládat jádra z různých materiálů. Postup je následující: Do dutiny uvnitř cívky vložíme testovaný materiál a LC obvod naladíme do rezonance. Potom na osciloskopu odečteme amplitudu napětí na kondenzátoru (nebo cívce). Jako materiál jádra můžeme použít různá feromagnetika: plná ocel, křemíkové plechy, Metglass, práškové železové jádro a ferit, nebo vzduch. Pomocí popsaného experimentu bylo zjištěno, že ztráty v mag. obvodu mají charakter činných ztrát a nejvýrazněji je ovlivňuje elektrická vodivost daného materiálu (vířivé proudy) a hysterezní ztráty. Nejvyšší činitel jakosti proto mají vzduchové cívky a cívky s feritovým jádrem. Tohoto podstatného poznatku využijeme pro konstrukci rezonančního motoru. Nebudeme se tedy snažit vyrobit rezonanční motor z plného železa, ani z izolovaných křemíkových plechů, ale buď z feritu, bez feromag. jádra (vzduchová cívka), případně z Metglassu (je drahý). (Poznámka: Abychom neustále nemuseli ladit rezonanci, s výhodou využijeme výše zmíněného vynálezu, který podmínku rezonance nastavuje automaticky.)

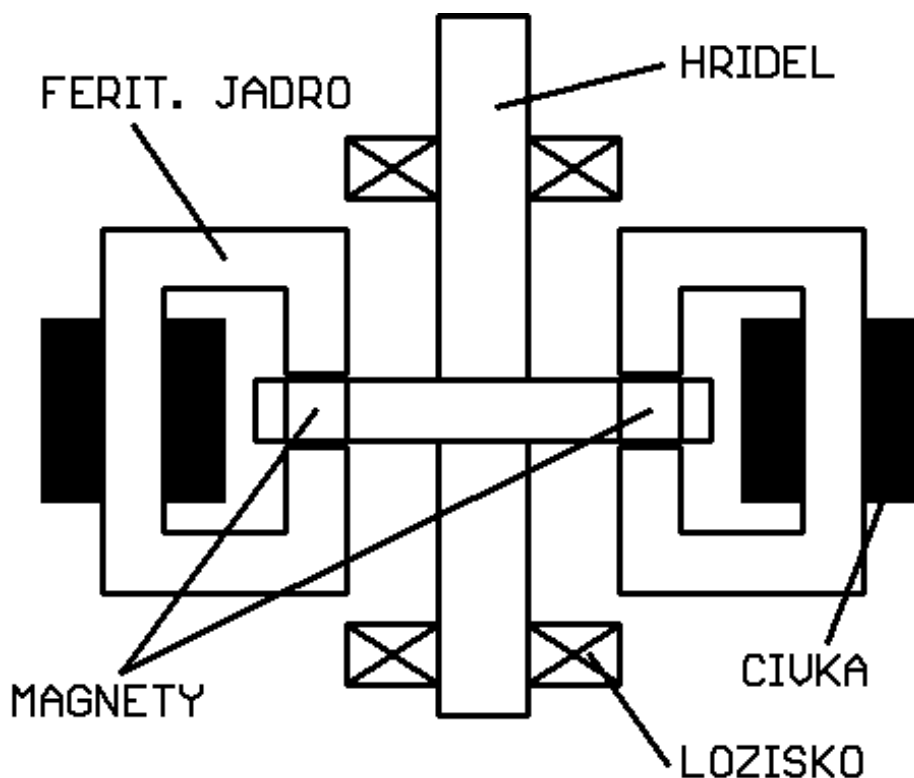
### Konstrukce rezonančního motoru

Na obr. 5 najdete konstrukci, která se spíše hodí pro experimentální ověření principu než pro sériovou výrobu.



Obr. 5. Lineární motor

Funkce tohoto motoru je na první pohled zřejmá z obrázku a není třeba ji detailně rozebírat. Na jednu otáčku setrvačnicku je třeba dvakrát změnit polaritu střídavého buzení cívky. Za zmínku stojí ještě to, že kruhová tyč, k níž je připevněn magnet, by měla být vyrobena z neferomagnetického materiálu a nejlépe z elektricky nevodivého. Výhodou tohoto uspořádání je konstrukční jednoduchost, názornost a nízké ztráty ve vzduchové cívce, které jsou prakticky frekvenčně nezávislé. Pro pomalejší motor s větším krouticím momentem použijeme magnet s vyšší remanentní indukci  $B_r$  na bázi vzácných zemin (CrMo nebo FeNdB), pro rychloběžný stroj použijeme levný feritový magnet. Pro konstrukci rezonančního motoru je také vhodné uspořádání s diskovým rotorem, na němž jsou umístěny permanentní magnety, které je zobrazeno na obr. 6.

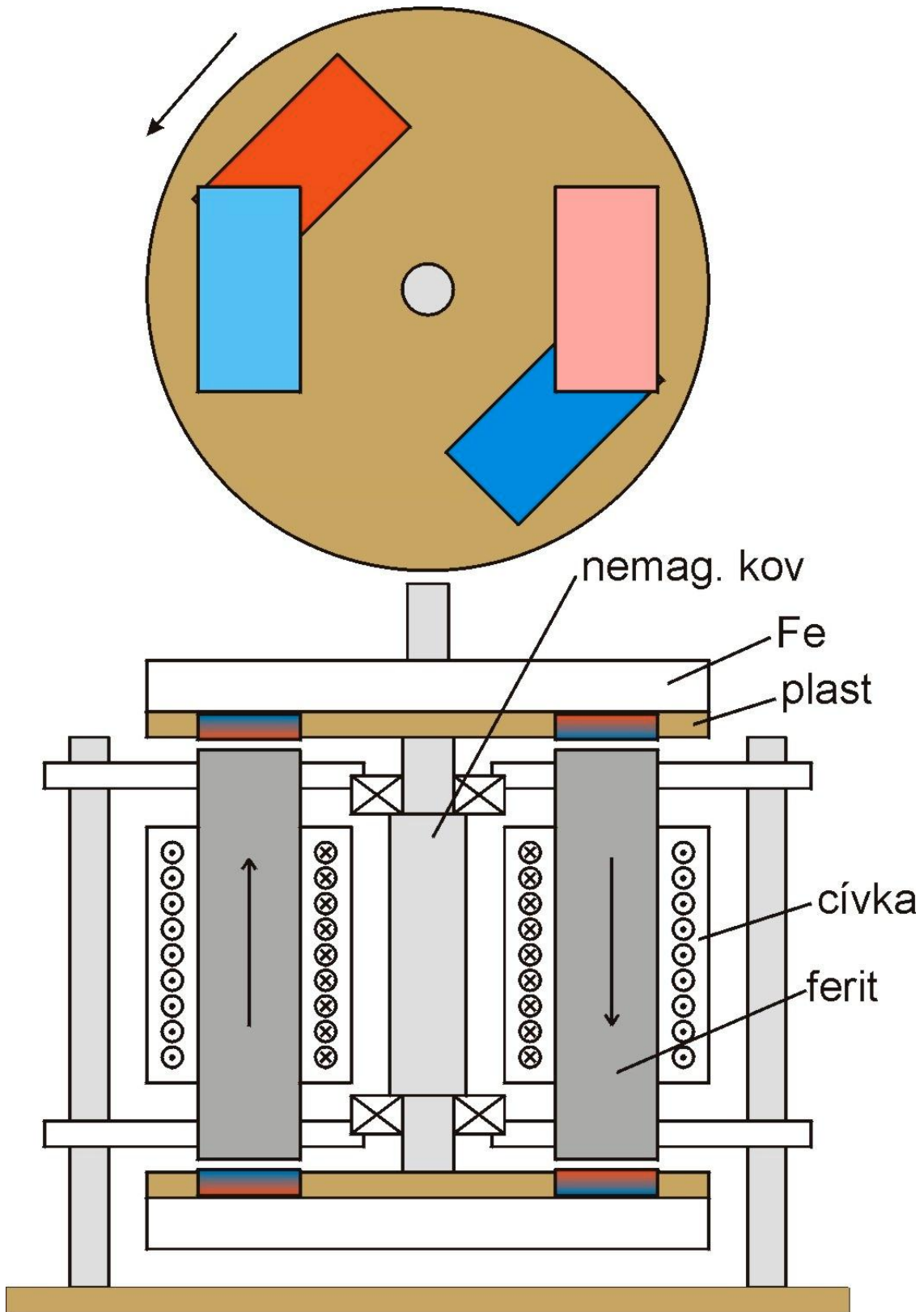


Obr. 6. Diskový motor

Kotouč rotoru by měl být vyroben z neferomagnetického a elektricky nevodivého materiálu (plast, sklotextit, apod.). Permanentní magnety jsou feritové a mohou být orientovány buď všechny shodně (např. severem nahoru), nebo střídavě (severem nahoru – severem dolů).

Statorových cívek kolem disku rotoru může být více (např. 4) v závislosti na průměru disku a počtu magnetů v rotoru. Tvar a velikost magnetů by měly přibližně odpovídat průřezu C – jádra statoru (např. obdélníkový nebo kruhový).

Zajímavá a netradiční konstrukce motoru je na obr. 7. Stator tvoří dvě cívky s jádrem z feritu. Magnetický obvod z obou stran cívky uzavírají dva kotouče rotoru s permanentními magnety. Kotouče, které přiléhají k magnetům a tvoří část magnetického obvodu, jsou vyrobeny z magneticky měkké oceli. Aby se zabránilo magnetickému zkratu, je hřídel vyroben z neferomagnetického kovu, například z pevné slitiny hliníku. Polarita magnetů v rotoru je volena tak, aby se přes stator uzavíral magnetický tok. Cívky jsou navinuty tak, aby obě buď magnety v rotoru přitahovaly, nebo odpuzovaly. V rotoru jsou dva kotouče z plastu (nebo jiného mat. s podobnými mag. a el. vlastnostmi), jehož účelem je zabránit tomu, aby odstředivé síly, působící na magnety, způsobily jejich uvolnění z rotoru. Oba kotouče rotoru jsou pevně spojeny s hřídelem např. pomocí per a drážek. U tohoto motoru je třeba během jedné otáčky rotoru jednou změnit polaritu napájecího napětí.



Obr. 7. Netradiční konstrukce motoru

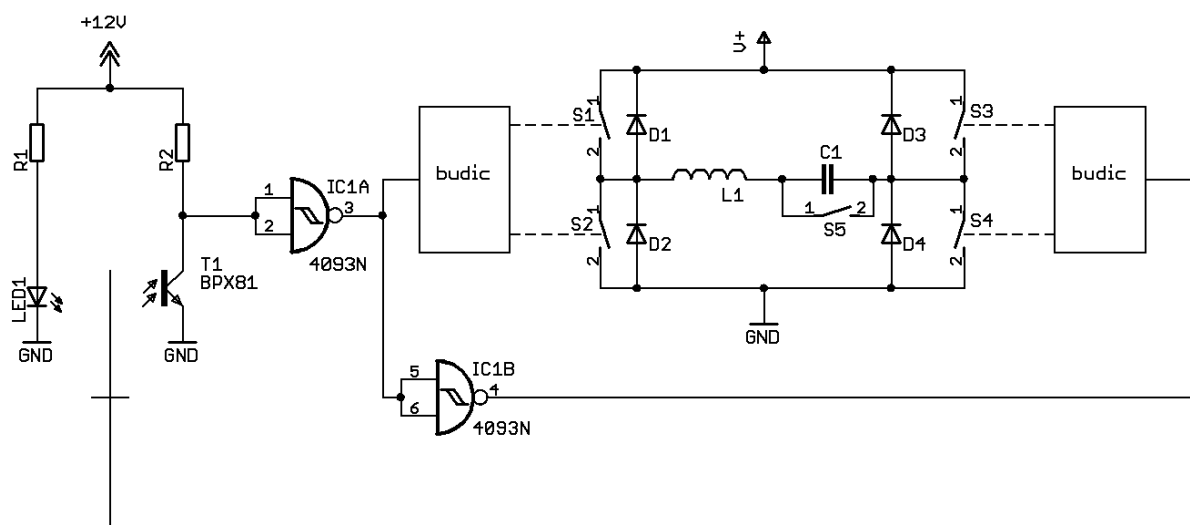
### Způsoby řízení rezonančního motoru

Všechny výše uvedené konstrukce motoru vhodné pro rezonanční řízení lze považovat za jednofázové synchronní stroje. Je známo, že synchronní motory je třeba nejdříve roztočit na synchronní otáčky, což je nepraktické. Aby tedy bylo možné využít výše zmíněný vynález, bylo by vhodné vyvinout speciální asynchronní motory s nízkými činnými ztrátami.

Rezonanční řízení jednofázového asynchronního motoru je dostatečně podrobně popsáno v patentu číslo 296623, proto se jím v tomto dokumentu nebudeme zabývat.

Nabízí se však jiné využití sériové rezonance, které se v experimentální praxi velmi dobře osvědčilo. Jestliže výše popsané motory budeme napájet ze stejnosměrného zdroje a proud do statorových cívek budeme přepínat v závislosti na poloze rotoru, dostaneme stejnosměrné motory s elektronickou komutací. Principu sériové rezonance můžeme použít i zde, pokud po dosažení určitých otáček zařadíme do obvodu statorové cívky kondenzátor o vhodné velikosti kapacity. V tomto případě se však rezonance dlouho neudrží, protože motor má tendenci zvyšovat otáčky nad rezonanční kmitočet. K rezonanci je možné jej přiblížit buď zvýšením mechanické zátěže na hřídeli, nebo zařazením kondenzátoru o nižší kapacitě. Poté se otáčky opět zvyšují a po jejich ustálení opět můžeme zařadit nižší kapacitu. Tento postup lze opakovat do té doby, dokud napětí indukované v cívce statoru pohybem magnetů v rotoru nepřekročí napájecí napětí.

Na obr. 8 je zobrazen základní princip tohoto druhu rezonančního řízení. V podstatě se jedná o čtyři elektronické spínače zapojené do H-můstku, v jehož diagonále je zapojena cívka v sérii s kondenzátorem. Kondenzátor je přemostěn spínačem pro snadnější rozběh.

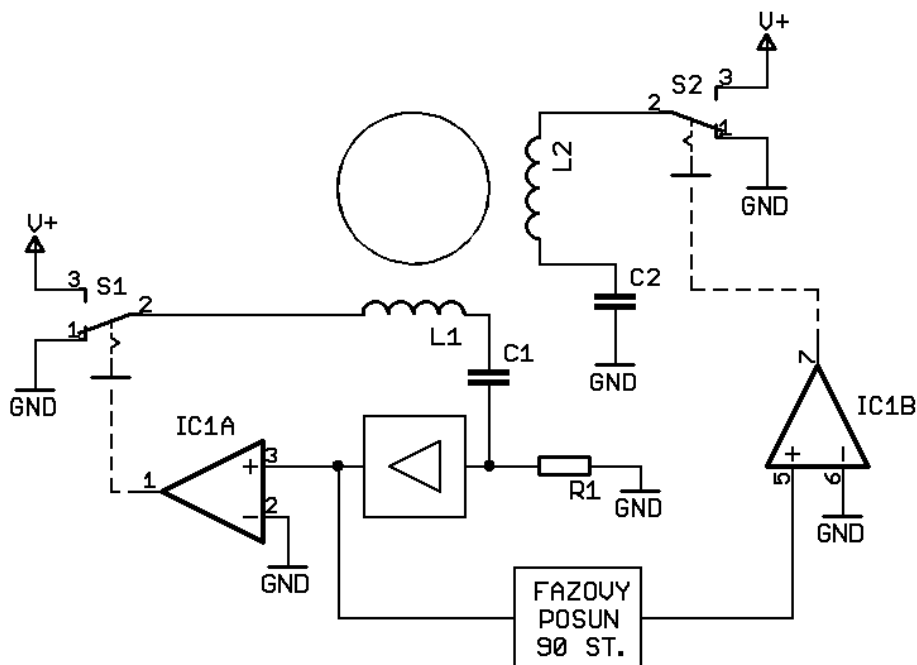


Obr. 8. Rezonanční řízení stejnosměrného motoru s elektronickou komutací

Kotouč s clonkou je připevněn k hřídeli motoru. Optická závora tvořená infračervenou diodou a optotranzistorem zajišťuje signál pro přepínání spínačů S1 – S4. Jsou-li sepnuty sínače S1 a S4, je na diagonále můstku napětí jedné polarity, jsou-li sepnuty S2 a S3, polarita je opačná. Zapojení na obr. 8 můžeme zdokonalit například tak, že budeme regulovat příkon motoru pomocí šířkové regulace. Dále je možné snímat proud tekoucí cívkou a pomocí šířkové modulace regulovat proud tekoucí cívkou a kondenzátorem.

## Rezonanční řízení vícefázového motoru

### Dvoufázový motor

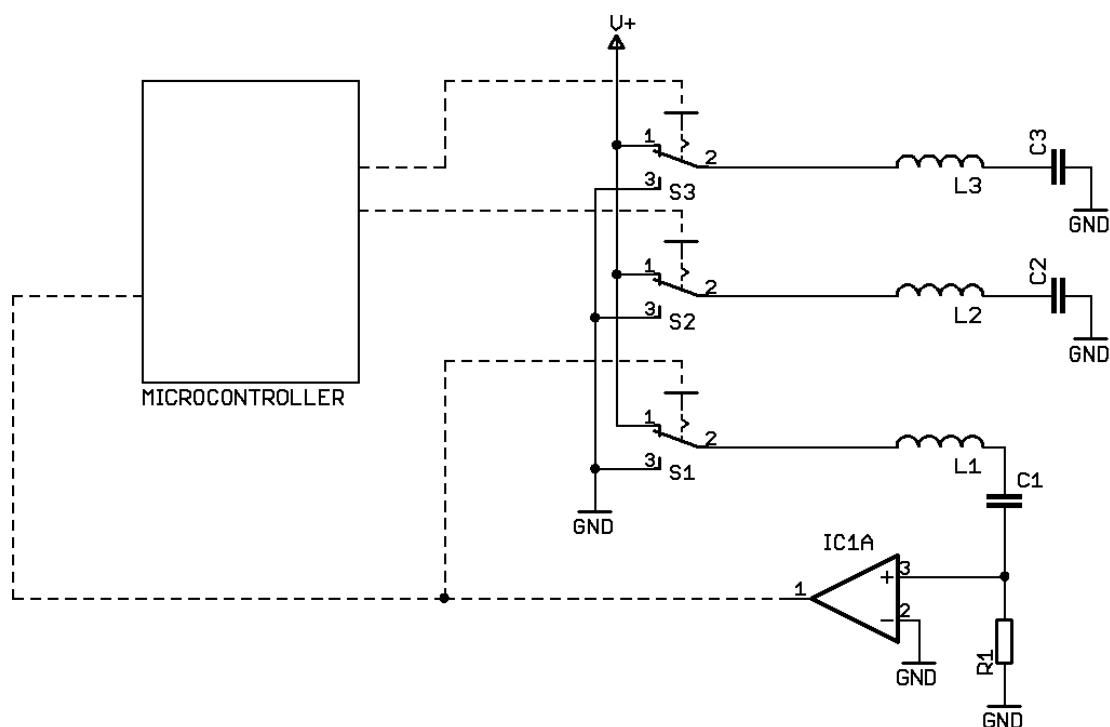


Obr. 9. Rezonanční řízení dvoufázového motoru

Jednofázový asynchronní motor má nevýhodu v tom, že pro rozběh potřebuje pomocnou fázi a kondenzátor nebo pomocné satorové póly se závitem nakrátko. To znesnadňuje jeho rezonanční řízení. Zapojení na obr. 9 umožňuje rezonanční řízení dvoufázového motoru. Satorová cívka L1, kondenzátor C1, rezistor R1, zesilovač signálu, komparátor IC1A a elektronický spínač S1 tvoří harmonický oscilátor. Zesílený úbytek napětí na R1 je také přiveden na vstup obvodu, který zajistí fázový posun o 90 stupňů. Takto upravený signál je veden na vstup druhého komparátoru IC1B, který ovládá elektronický spínač S2. Jako komparátor můžeme s výhodou použít integrovaný obvod LM 2903, který lze napájet z nesymetrického zdroje. Fázový posun lze realizovat např. pomocí integrátoru nebo derivátoru. Elektronické spínače mohou tvořit výkonové tranzistory MOSFET nebo IGBT, jako budiče dobře poslouží např. IR2103 (jeden vstup mají invertovaný).



## Třífázový motor



Obr. 10. Rezonanční řízení třífázového motoru

Realizace rezonančního řízení u třífázového motoru pomocí analogové techniky by byla komplikovaná, proto bylo zvoleno řešení s jednočipovým mikropočítačem. Fáze L1 je řízena analogově pomocí komparátoru a zbylé dvě fáze jsou řízeny mikropočítačem. Funkce programu je velmi jednoduchá: Výstup komparátoru je přiveden na vstup mikropočítače, který změří délku impulsu na výstupu komparátoru. Změna úrovně na tomto vstupu zároveň slouží k spuštění časovačů pro řízení zbylých dvou fází. Zapojení bude fungovat správně, pokud součiny LC budou u všech fází shodné, nebo činitel jakosti LC obvodu bude tak nízký, že rozptýl hodnot kapacit a indukčností nebude vadit (plochá rezonanční křivka). (Totéž platí pro zapojení na obr. 9.) Další možností by bylo mít všechny tři fáze řízené analogově a okamžik sepnutí jednotlivých elektronických spínačů S1-S3 řídit pomocí mikropočítače. Na trhu existuje řada vhodných mikrokontrolérů, například nejlevnější PIC od Microchipu nebo Nitron od Motoroly (nyní Freescale). Při volbě napětí stejnosměrného napájecího zdroje musíme počítat s tím, že napájecí napětí je přímo úměrné ztrátám motoru. (Když jako materiál mag. obvodu použijeme např. křemíkové plechy, bude napětí napájecího zdroje několikanásobně vyšší než při použití třeba feritu.)

### Závěr:

Konstrukce frekvenčního měniče pomocí rezonančního řízení má řadu výhod. Vedle jednoduchosti, vysoké účinnosti a nízkého zatížení spínacích tranzistorů (spínají při průchodu proudem nulou) je to minimální rušení, které je u současných frekvenčních měničů trvalým problémem.

## Dodatek 1

### Rezonanční versus konvenční elektromotor

Přednosti rezonančního řízení si nyní ukážeme na jednoduchém příkladu. Uvažujme soustavu s jedním alternátorem a synchronním motorem. Pro názornost uvažujme netradiční konstrukci podle obr. 5. Tuto konstrukci jsem zvolil také proto, že jediné činné ztráty tvoří ohmický odpor cívky, který je v širokém rozsahu frekvenčně nezávislý. Předpokládejme, že otáčky motoru (resp. frekvence alternátoru) jsou tak vysoké, že reaktance cívky mnohonásobně převyšuje činný odpor jejího vinutí. V tom případě můžeme činný odpor zanedbat a proud procházející elektrickým obvodem je za napětím zpožděn o 90 stupňů. Jestliže obvodem protéká proud

$$i = I \cdot \sin \omega t \quad , \quad (1)$$

potom napětí, které se indukuje v cívce je

$$u = L \cdot di/dt = \omega \cdot L \cdot I \cdot \cos \omega t \quad (2)$$

a rovná se svorkovému napětí alternátoru.

Okamžitý výkon odebíraný z alternátoru v tomto případě je

$$P(t) = u(t) \cdot i(t) = \omega \cdot L \cdot I^2 \cdot \sin \omega t \cdot \cos \omega t \quad (3)$$

Střední hodnota tohoto výkonu je

$$P_{\text{stř}} = 2/T \int_0^{T/2} \omega \cdot L \cdot I^2 \cdot \sin \omega t \cdot \cos \omega t \cdot dt = 2/T \cdot \omega \cdot L \cdot I^2 \cdot [1/(2\omega) \cdot \sin^2 \omega t]_0^{T/2} = 0 \quad (4)$$

Teoreticky by tedy střední hodnota mechanického příkonu (neuvažujeme-li mechanické ztráty např. třením) by měla být rovna nule. Jinými slovy: alternátor by měl mechanický výkon odebírat i odevzdávat, takže jeho střední hodnota se rovná nule. Položme si otázku: Jak je to s výkonem motoru? Jestliže z motoru není odebírán mechanický výkon, je napětí  $U_i$  indukované v cívce pohybem rotoru s permanentními magnety v protifázi k svorkovému napětí alternátoru. Když rovnováhu porušíme tím, že hřídel mechanicky zatížíme, napětí  $U_i$  již nebude proti svorkovému napětí alternátoru posunuto o 180 stupňů. Podle zákona o zachování energie se dá předpokládat, že toto porušení rovnováhy bude mít za následek mechanické zatížení hřídele alternátoru. Je tomu skutečně tak?

Nyní pro ilustraci vypočítáme konkrétní příklad. Indukčnost cívky motoru je  $L = 0,1 \text{ H}$ , činný odpor jejího vinutí je  $R = 6 \ \Omega$  a úhlová frekvence alternátoru je  $\omega = 1000 \text{ rad}^{-1}$ . Naším úkolem bude vypočítat potřebné napětí alternátoru, jestliže efektivní hodnota proudu procházejícího cívkou je 2 A. Dále určíme potřebný výkon alternátoru.

Jestliže zanedbáme  $U_i$ , bude efektivní hodnota svorkového napětí alternátoru rovna napětí, jež se indukuje v cívce při průchodu střídavého proudu (1):

$$U = \omega.L.I = 1000.0,1.2 = 200V.$$

Potřebný výkon alternátoru je

$$P_1 = U.I = 200.2 = 400VA.$$

Činný výkon odebíraný motorem je

$$P_2 = R.I^2 = 6.2^2 = 24W$$

Porovnáme-li potřebný výkon alternátoru s odebíraným činným výkonem motoru, vidíme obrovský nepoměr.

Nyní do obvodu mezi alternátor a motor zařadíme kondenzátor o takové velikosti kapacity, že bude splněna podmínka rezonance.

$$\omega^2 = 1/(L.C) \quad (5)$$

Potřebná kapacita kondenzátoru je

$$C = 1/(\omega^2.L) = 1/(10^6.10^{-1}) = 10^{-5} F = 10\mu F.$$

V tomto případě je efektivní hodnota napětí na cívce také rovna 200 V, ale na kondenzátoru je stejná hodnota napětí, které je proti napětí na cívce posunuto o 180 stupňů. Efektivní hodnota požadovaného napětí alternátoru je zde pouze

$$U = R.I = 6.2 = 12V$$

a potřebný výkon alternátoru je roven činnému příkonu motoru, tj. 24W.

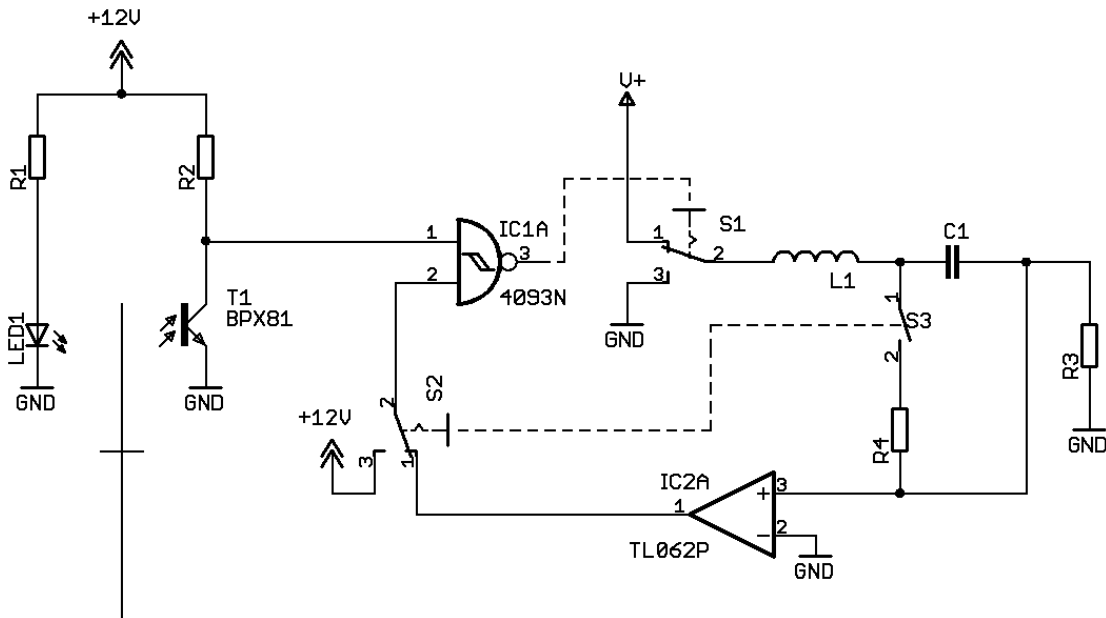
Kromě toho, když přesně naladíme rezonanci, můžeme tak vykompenzovat i fázový posun  $U_i$ , takže bude v protifázi k svorkovému napětí alternátoru.

Zde se nabízí otázka: Jaký je mechanický výkon motoru? Je skutečně menší než jeho činný příkon? Pokud je tomu skutečně tak, potom použitím tlustšího drátu s menším činným odporem bychom snížili výkon motoru, protože se snížily jeho činné ztráty. To je absurdní představa!

## Dodatek 2

### Kombinované rezonanční řízení

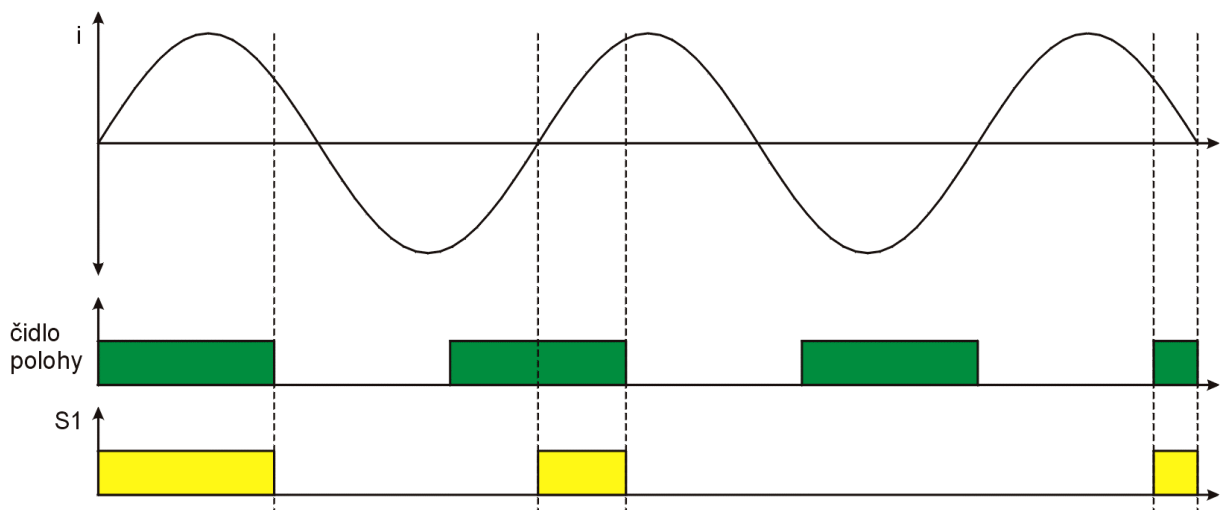
Rezonanční řízení stejnosměrného motoru s elektronickou komutací podle obr. 8 má nevýhodu v tom, že naprázdno má otáčky mnohem vyšší než rezonanční. Popisované zapojení má tento nedostatek odstranit.



Obr. 11. Kombinované rezonanční řízení

#### Popis funkce

Při rozběhu motoru je přepínač S2 v poloze 3 a spínač S3 je sepnut. Rezistor R4 slouží k rychlému odbuzení statorové cívky L1 motoru po přepnutí elektronického přepínače S1 do polohy 3. Po dosažení rezonančních otáček se S2 přepne do polohy 1 a S3 se rozezne. Součinné hradlo IC1A zajišťuje, aby k přepnutí elektronického přepínače došlo až při průchodu proudu procházejícího rezonančním obvodem a rezistorem R3 nulou směrem ke kladným hodnotám, jak ilustruje obr. 11.

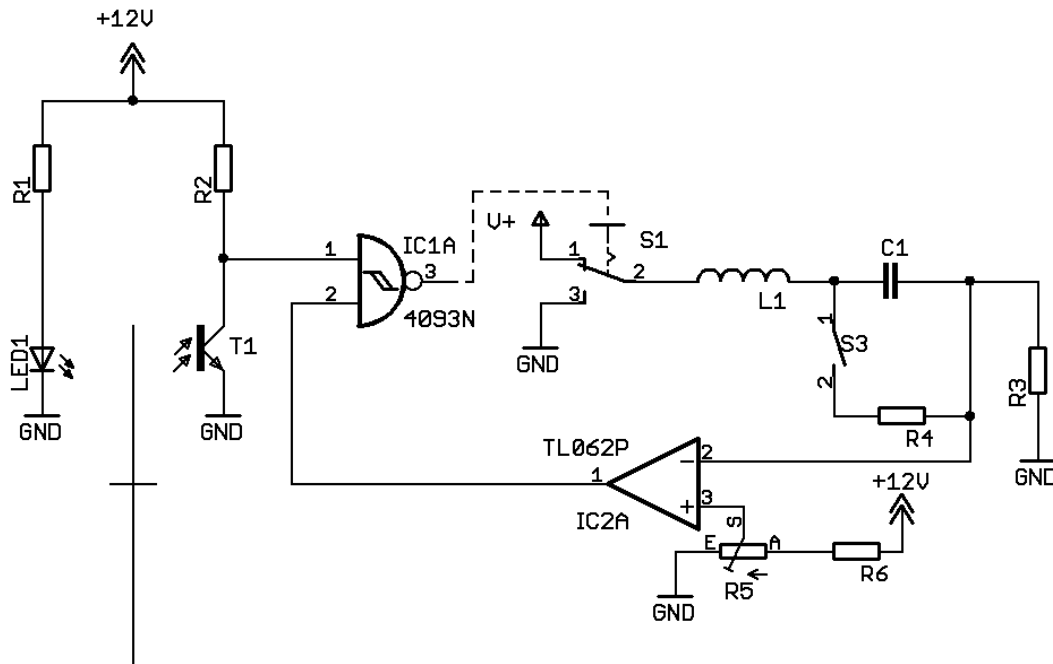


Obr. 11. Průběhy veličin

### Dodatek 3

## Rezonanční řízení s proudovou pojistkou

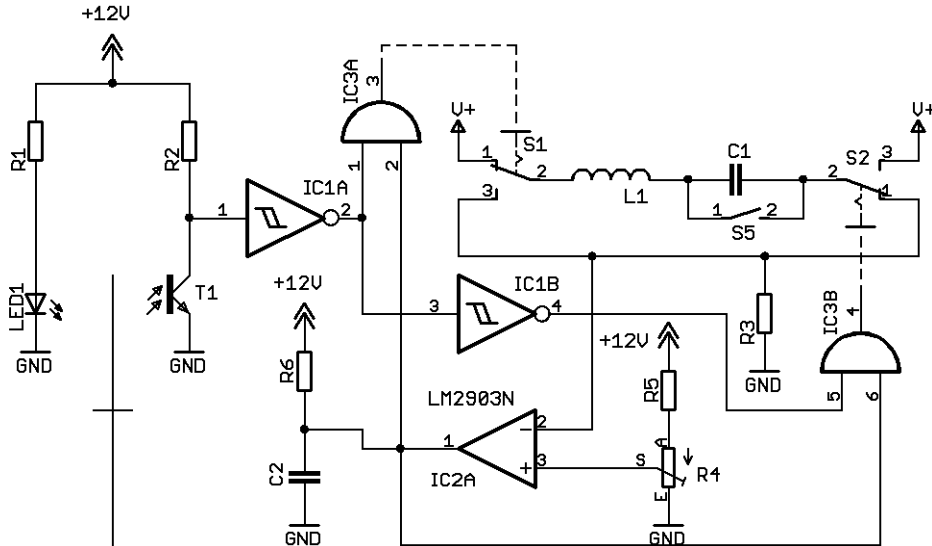
Jak bylo uvedeno výše, problémy s indukovaným napětím  $U_i$  lze řešit aplikací úzkých impulzů o vyšším napětí tak, aby energie jednoho impulsu zůstala zachována (jako v případě delšího impulsu o nižším napětí). Lze to řešit různými způsoby. Jednoduché a elegantní řešení je omezení maximálního proudu pomocí komparátoru, jak můžete vidět na obr. 12. Potom i při různé velikosti napájecího napětí lze příkon motoru jednoduše řídit pomocí napětí přivedeným na referenční vstup (3) komparátoru IC2A.



Obr. 12. Rezonanční řízení s proudovou pojistkou

#### Popis funkce:

Neteče-li rezonančním obvodem proud, je na výstupu komparátoru (1) logická jednička. Jakmile rozeprne optotranzistor T1, elektronický přepínač S1 se přepne do polohy 1 a silovým obvodem začne protékat proud. Po dosažení jisté hodnoty se výstup komparátoru změní na log. 0 a S1 se přepne do polohy 3. Bude-li obvod v rezonanci (nebo blízko ní) proud obvodem bude podle sinusové funkce dále stoupat a potom klesat. Po určité době dané rezonančním kmitočtem obvodu se výstup komparátoru opět přepne do log. 1. V té době však je T1 opět sepnut (log. 0) a k opětovnému přepnutí S1 už nemůže dojít. Po rozeprnutí T1 se děj opakuje. Variantu s řízením pomocí úplného můstku najdete na obr. 13. Hlavní odlišnost od zapojení na obr. 12 spočívá v tom, že na výstupu komparátoru musí být monostabilní klopný obvod (naznačen odporem R6 a kondenzátorem C2), protože po přepnutí S1 do polohy 3 (nebo S2 do polohy 1) odporem R3 okamžitě přestane téct proud a došlo by k „zacyklení“.



Obr. 13. Provedení s úplným můstkem

**Popis funkce:**

Předpokládejme, že rezonančním obvodem (resp. rezistorem R3) neprotéká proud. Komparátor IC2A má výstup v log.1. Jakmile se sepnou T1, S1 se přepne do polohy 1 (na V+) a S2 přes R3 na zem. Jakmile vzroste napětí na R3 nad referenční napětí na neinvertujícím vstupu (3) komparátoru, jeho výstup se změní na log. 0 a vybije C2, S1 se přepne do polohy 3 a proud LC obvodem se začne uzavírat mimo R3. V tom okamžiku se přepne výstup komparátoru opět do log. 1, avšak S1 se zatím nepřepne, protože C2 je vybit. Pro správnou funkci je důležité, aby časová konstanta C2R6 byla dostatečně velká (ne však příliš velká), aby k sepnutí S1 (na V+) během periody došlo pouze jednou.

Poslední změna: 15. VI. 06

Zpracoval: ing. Ladislav Kopecký