

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Simulační modely pulzních měničů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Kristýna RYBOVÁ**
Osobní číslo: **E11B0156P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Simulační modely pulzních měničů**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište principy, funkce a způsoby použití vybraných typů pulzních měničů.
2. Navrhněte pro tyto typy měničů simulační modely v prostředí Matlab/Simulink, popř. PLECS. Věnujte pozornost tomu, aby modely mohly být využity ve výuce.
3. Zhodnoťte funkci simulačních modelů, analyzujte vliv různých parametrů (např. spínací frekvence, typ zátěže).

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Glasberger, Ph.D.**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**


Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Tato práce se zabývá popisem a návrhem simulačních modelů pulzních měničů. Simulace byly realizovány v prostředí Matlab/Simulink s pomocí knihovny PLECS, která obsahuje speciální prvky pro simulaci problémů z oboru elektrických pohonů a výkonové elektroniky. Modely byly navrženy tak, aby byly snadno použitelné a rozšiřitelné ve výuce vybraných předmětů na katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky.

V teoretické části jsou představeny jednotlivé typy pulzních měničů a popsáno prostředí, ve kterém byly tvořeny simulace, tedy Matlab, Simulink a PLECS. Část praktická se pak věnuje samotným simulačním modelům, sledován je zejména vliv změny různých parametrů na průběh napětí a proudu.

Klíčová slova

pulzní měnič pro snižování napětí, pulzní měnič pro zvyšování napětí, čtyřkvadrantový pulzní měnič, simulace, Simulink, PLECS

Abstract

This thesis is deals with proposal and design of buck converters simulation models. Simulations are designed in Matlab/Simulink environment with PLECS additional toolbox which contains special tools for simulations focused on electric drives and power electronics. Models were designed in the way to be easily used in selected courses at the Department of electromechanical systems and power electronics.

In the theoretical part, several types of buck converters are presented and the development environment is described, which the simulations are created (Matlab, Simulink, PLECS) in. The practical part deals with the designed simulation models, particularly the influence of change of selected circuit parameters on current and voltage profile is observed.

Key words

voltage step-down buck converter, voltage step-up buck converter, four-quadrant buck converter, simulation, Simulink, PLECS

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 9. 6. 2014

Kristýna Rybová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Glasbergerovi, Ph.D. za užitečné rady při tvorbě simulačních modelů a neméně cenné připomínky při vypracování této práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 PULZNÍ MĚNIČE	11
1.1 PULZNÍ MĚNIČ PRO SNIŽOVÁNÍ NAPĚTÍ	11
1.2 PULZNÍ MĚNIČ PRO ZVYŠOVÁNÍ NAPĚTÍ	13
1.3 PULZNÍ MĚNIČ ODPORU	14
1.3.1 <i>Sériový pulzní měnič odporu</i>	15
1.3.2 <i>Paralelní pulzní měnič odporu</i>	16
1.4 PRAKTICKÁ APLIKACE	17
1.5 ČTYŘKVADRANTOVÝ PULZNÍ MĚNIČ	18
2 POPIS PROSTŘEDÍ MATLAB/SIMULINK/PLECS	22
2.1 ZÁKLADNÍ STRUKTURA SYSTÉMU	22
2.2 PRACOVNÍ PLOCHA MATLABU	22
2.3 SIMULINK	22
2.4 PLECS	23
3 SIMULAČNÍ MODEL Y PULZNÍCH MĚNIČŮ	24
3.1 PULZNÍ MĚNIČ PRO SNIŽOVÁNÍ NAPĚTÍ	24
3.1.1 <i>Změna parametrů</i>	24
3.1.2 <i>Změna spínací frekvence</i>	26
3.1.3 <i>Změna poměrného sepnutí</i>	27
3.1.4 <i>Změna indukovaného napětí</i>	28
3.2 PULZNÍ MĚNIČ PRO ZVYŠOVÁNÍ NAPĚTÍ	30
3.2.1 <i>Změna parametrů</i>	30
3.2.2 <i>Změna indukčnosti</i>	31
3.2.3 <i>Změna odporu</i>	32
3.2.4 <i>Změna indukovaného napětí</i>	34
3.3 ČTYŘKVADRANTOVÝ PULZNÍ MĚNIČ	35
3.3.1 <i>Změna parametrů</i>	35
3.3.2 <i>První kvadrant</i>	37
3.3.3 <i>Druhý kvadrant</i>	39
3.3.4 <i>Třetí kvadrant</i>	41
3.3.5 <i>Čtvrtý kvadrant</i>	43
3.4 UŽIVATELSKÁ APLIKACE	45
3.5 ZVLNĚNÍ PROUDU	46
4 ZÁVĚR	48
5 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	49
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

C	kondenzátor
i	celkový proud
i_d	časový průběh proudu zátěží
I_d	střední hodnota proudu zátěží
i_v	okamžitá hodnota proudu tranzistorem
i_{v0}	okamžitá hodnota proudu nulovou diodou
L	indukčnost zátěže
R	odpor zátěže
R_b	brzdny odpor
R_e	ekvivalentní odpor obvodu
T	perioda spínání
T_1	interval sepnutí tranzistoru
T_2	interval vypnutí tranzistoru
U	napětí zdroje
u_d	okamžitá hodnota napětí na zátěži
U_d	střední hodnota napětí na zátěži
U_i	indukované napětí zátěže
V, V1 - V4, V_b	tranzistory
V0, V01 – V04, V_{0b}	nulové diody
z	poměrná doba sepnutí tranzistoru

Úvod

Předkládaná bakalářská práce byla vypracována především z důvodu vytvoření simulačních modelů k výuce předmětů zabývajících se výkonovou elektronikou. Dále byla vytvořena aplikace, pomocí které lze snadno ovládat vytvořené simulační modely a měnit parametry simulací.

První kapitola se zabývá popisem jednotlivých typů pulzních měničů a jejich vlastností. Jsou vyobrazena základní schémata, popsány principy funkce a zobrazeny průběhy proudu zátěží a napětí na zátěži.

Druhá kapitola je věnována prostředí, ve kterém byly vytvářeny simulace. Je obecně popsáno programové prostředí Matlabu, grafické prostředí Simulinku, ve kterém bylo realizováno řízení simulovaných měničů a vizualizace výstupních průběhů, a PLECSu, který jako jedna z knihoven Simulinku sloužil k vytvoření obvodů měničů.

Třetí kapitola je zaměřena na samotné simulační modely. Sledován je vliv změny parametrů v obvodu zejména na průběh a velikost zvlnění proudu protékajícího zátěží a na průběh napětí na zátěži. Zároveň jsou pomocí schémat předvedeny rozdíly v grafické podobě částí modelů sestavených v prostředí Simulinku a PLECSu.

1 Pulzní měniče

Pulzní měniče jsou měniče stejnosměrné, tedy slouží ke spínání stejnosměrného proudu. Základem je obvod stejnosměrného spínače, který periodicky spínáme. Tím je na zátěž přiváděn pulzní průběh napětí, jehož střední hodnotu lze upravovat vhodným řízením. [1]

Jako spínač je možné použít např. tyristor, ten je však nutno doplnit vhodným komutačním obvodem, aby bylo možné jej vypínat. K vypínání nelze použít, jako např. u usměrňovačů, napětí zdroje, neboť nemění svou polaritu. Pulzní měniče se proto řadí mezi měniče s vlastní komutací. Tyristor se z důvodu potřeby vypínacího obvodu již nepoužívá, byl nahrazen vypínatelným tyristorem nebo častěji tranzistorem IGBT. V dalším textu budou slova spínač a tranzistor používána jako synonyma. [1]

Všechny následující typy nalézají využití v elektrické trakci (tramvaje, trolejbusy, lokomotivy). [2]

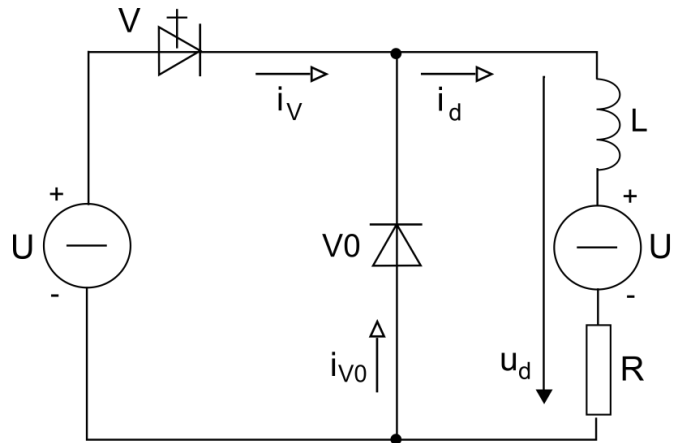
1.1 Pulzní měnič pro snižování napětí

Schéma zapojení je na *Obr. 1*. Obvod se skládá ze spínače V, nulové diody V0 a obecné zátěže R, L, U_i. Uvažujme periodu spínání T. V intervalu T₁, kdy je spínač V sepnut, teče proud tranzistorem a na zátěži je napětí napájecího zdroje, tedy $i_d = i_v$ a $u_d = U$. V intervalu T₂, kdy je spínač vypnutý, se proud uzavírá přes nulovou diodu V0 a napětí na zátěži klesne na nulu, tedy $i_d = i_{v0}$ a $u_d = 0$. Tyto poměry názorně ukazuje graf na *Obr. 2*. Jeho součástí je též spínací diagram znázorňující intervaly, kdy je tranzistor sepnut (T₁) a kdy vypnut (T₂) Červená křivka znázorňuje průběh napětí na zátěži u_d , modrá proud tranzistorem i_v a zelená průběh proudu diodou i_{v0} . [1]

Pomocí napětí zdroje U, periody spínání T a intervalu sepnutí T₁ lze určit střední hodnotu napětí na zátěži [2]:

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_1} U dt = \frac{T_1}{T} U = z \cdot U \quad (1.1)$$

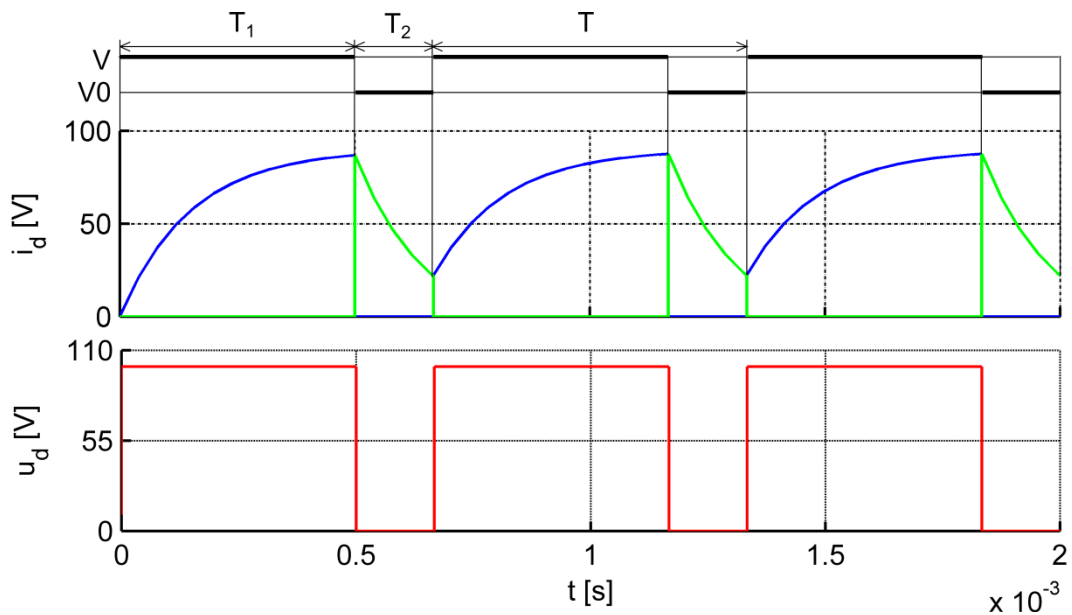
kde z je poměrná doba sepnutí nabývající hodnot od 0 do 1. Z toho vyplývá možnost regulace napětí v rozsahu $0 \leq U_d \leq U$. [1]



Obr. 1: Schéma pulzního měniče pro snižování napětí [1]

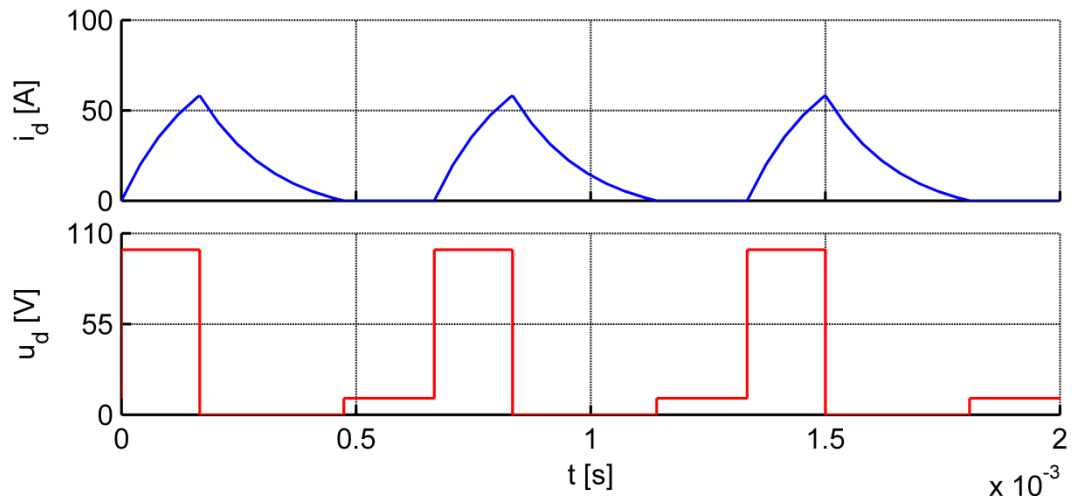
V ustáleném stavu se indukčnost chová jako zkrat, tedy $L = 0$. Střední hodnotu proudu zátěží lze potom určit jako [1]:

$$I_d = \frac{U_d - U_i}{R} = \frac{z \cdot U - U_i}{R} \quad (1.2)$$



Obr. 2: Průběhy proudů a napětí v pulzním měniči pro snižování napětí při $z = 0,75$

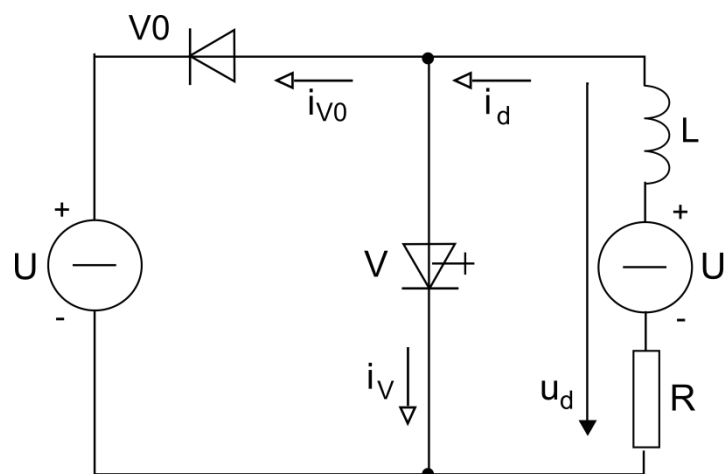
Výše popsané poměry nastávají v případě, že zátěží protéká nepřerušovaný proud. V případě přerušovaného proudu dojde k tomu, že proud zátěží dosáhne nulové hodnoty dříve, než dojde k dalšímu sepnutí tranzistoru. Při každém sepnutí spínače tedy proud vzrůstá od nulové hodnoty. Střední hodnota napětí je při nulovém proudu rovna U_i . Průběh napětí a proudu při přerušovaném proudu znázorňuje Obr. 3. [1]



Obr. 3: Průběhy proudů a napětí na zátěži pulzního měniče pro snižování napětí v oblasti přerušovaných proudů při $z = 0,25$

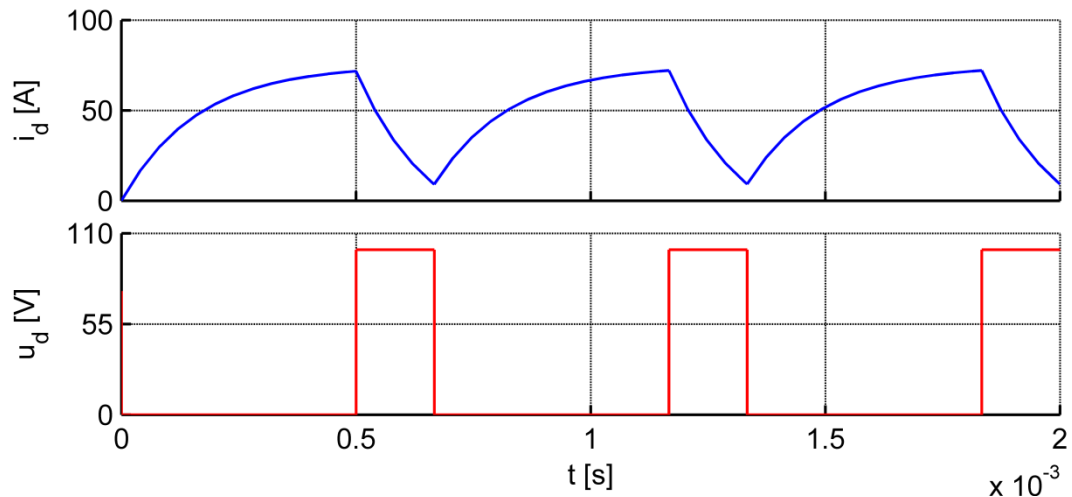
1.2 Pulzní měnič pro zvyšování napětí

Schéma je na Obr. 4. Obvod měniče pro zvyšování napětí se skládá ze spínače V, nulové diody V0 a obecné zátěže R, L, U_i , přičemž podmínkou řízené rekuperace energie ze zátěže do zdroje napětí je $U_i < U$. Dioda V0 znemožňuje zkrat do zdroje v taktu T_1 , kdy je sepnut spínač. Proud se uzavírá přes tranzistor a na zátěži je nulové napětí, tedy $i_d = i_V$ a $u_d = 0$. V taktu T_2 , když je spínač vypnut, teče proud diodou a na zátěži se objeví napětí zdroje, $i_d = i_{V0}$ a $u_d = U$. [1]



Obr. 4: Schéma zapojení pulzního měniče pro zvyšování napětí

Proudové a napěťové poměry v obvodu jsou názorně vidět v grafu na Obr. 5. Modrá křivka znázorňuje průběh proudu protékajícího zátěží a červená průběh napětí na zátěži.



Obr. 5: Průběh proudů a napětí ve zvyšovacím pulzním měniči při $z = 0,75$

Stejně jako u pulzního měniče pro snižování napětí lze stanovit střední hodnotu napětí na zátěži, na rozdíl od předchozího případu je však zátěž připojena ke zdroji napětí v taktu T_2 [2]:

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_2} U dt = \frac{T_2}{T} U = \frac{T - T_1}{T} U = (1 - z)U \quad (1.3)$$

Střední hodnotu proudu zátěži lze určit opět pro ustálený stav, kdy je indukčnost L ideálně nulová [1]:

$$I_d = \frac{U_i - U_d}{R} = \frac{U_i - U(1 - z)}{R} \quad (1.4)$$

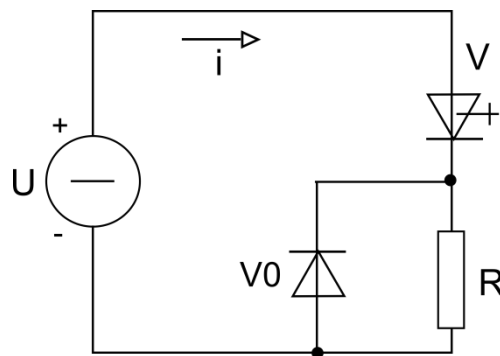
Střední hodnota proudu zátěži musí být vždy kladná, pulzní měnič pro zvyšování napětí tudíž neumožňuje přenos energie ze zdroje energie do zátěže, ale pouze naopak. Z toho plynou podmínky provozu a současně podmínky rekuperace energie: $I_d > 0$ a tedy $U_i > U_d$. [1]

1.3 Pulzní měnič odporu

Pulzní řízení odporu pomocí polovodičových součástek je narušeno od klasického způsobu řízení bezkontaktní, díky čemuž jej lze snadno ovládat regulátorem a plynule řídit. Princip funkce spočívá v tom, že změnou poměrné doby sepnutí z se mění hodnota ekvivalentního odporu obvodu R_e . Spínač lze do obvodu zapojit dvěma způsoby, a to do série s odporem nebo paralelně k odporu. [1]

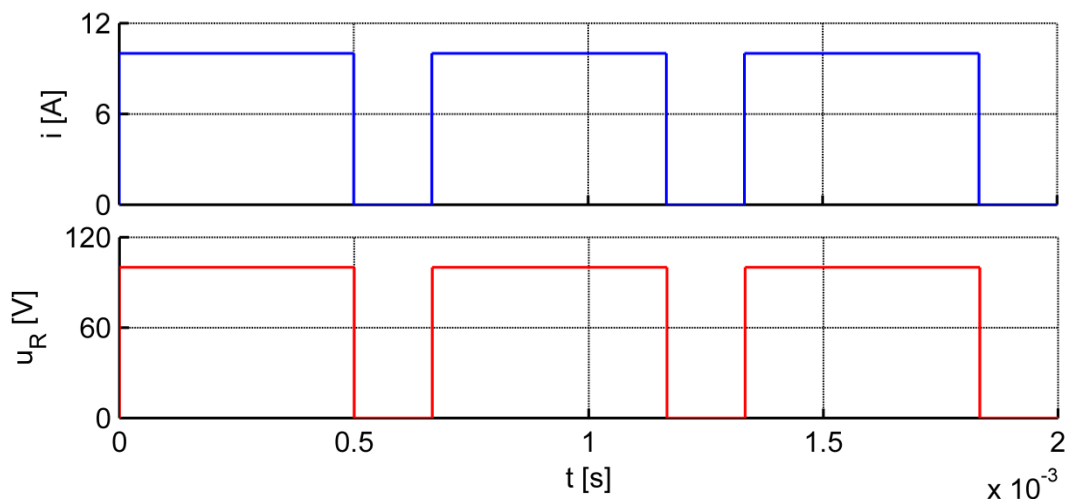
1.3.1 Sériový pulzní měnič odporu

Schéma sériového pulzního měniče odporu je na *Obr. 6*. Obvod obsahuje nulovou diodu V_0 , odpor R a spínač V zapojený do série s odporem. V taktu T_1 je spínač sepnut, proud teče tranzistorem a na odporu je napětí zdroje. Když je spínač v taktu T_2 vypnutý, proud odporem neteče a napětí na odporu je též rovné nule. [3]



Obr. 6: Schéma sériového pulzního měniče odporu

Tyto poměry jsou znázorněny grafy na *Obr. 7*, kde modrá křivka symbolizuje průběh proudu odporem R a červená křivka znázorňuje průběh napětí na odporu v průběhu tří spínacích period.



Obr. 7: Průběhy napětí a proudu pro sériový pulzní měnič odporu při $z = 0,75$

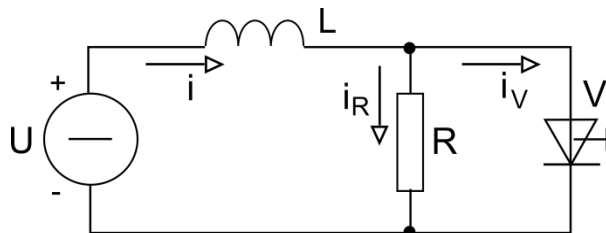
Z těchto poměrů lze odvodit vztah pro výpočet hodnoty ekvivalentního odporu, která odpovídá střední hodnotě proudu I_d [3]:

$$I_d T = \frac{U}{R} T_1 = \frac{U}{R_e} T \Rightarrow R_e = \frac{T}{T_1} R = \frac{R}{z} \quad (1.5)$$

V případě trvale sepnutého spínače, tzn. pro $z = 1$, je ekvivalentní odpor roven nule. Pokud je spínač trvale vypnut, čemuž odpovídá poměrná doba sepnutí $z = 0$, blíží se hodnota ekvivalentního odporu nekonečnu. Změnou poměrného sepnutí v intervalu $0 \leq z \leq 1$ lze tedy řídit hodnotu ekvivalentního odporu v intervalu $R \leq R_e < \infty$. [3]

1.3.2 Paralelní pulzní měnič odporu

Schéma zapojení je znázorněno na *Obr. 8*. Sestává z odporu R , spínače V zapojeného paralelně k odporu a nezbytnou součástí obvodu je též tlumivka L , která omezuje strmost nárůstu a poklesu proudu při spínání. V intervalu T_1 je spínač sepnutý, proud se uzavírá přes tranzistor a na odporu je nulové napětí. V intervalu T_2 , kdy je spínač vypnutý, teče proud odporem, který je připojen ke zdroji napětí. Tyto poměry jsou názorně vidět na *Obr. 9*. Zelená křivka znázorňuje celkový proud i , modrá křivka průběh proudu odporem, červená křivka průběh napětí na odporu. [1]

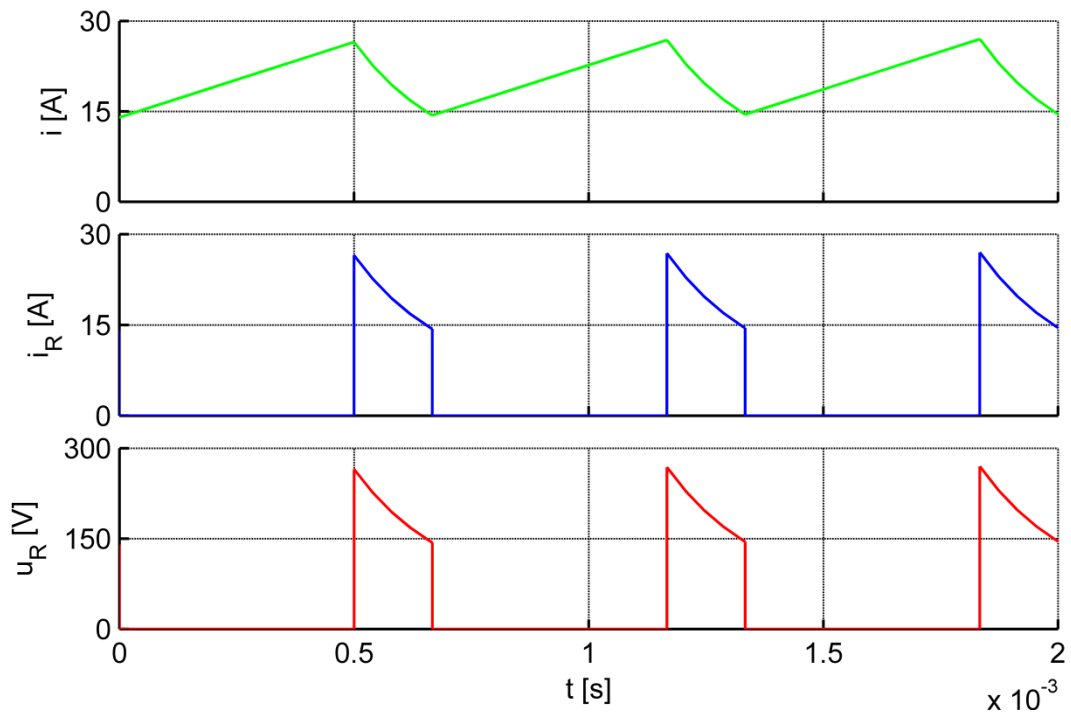


Obr. 8: Schéma paralelního pulzního měniče odporu

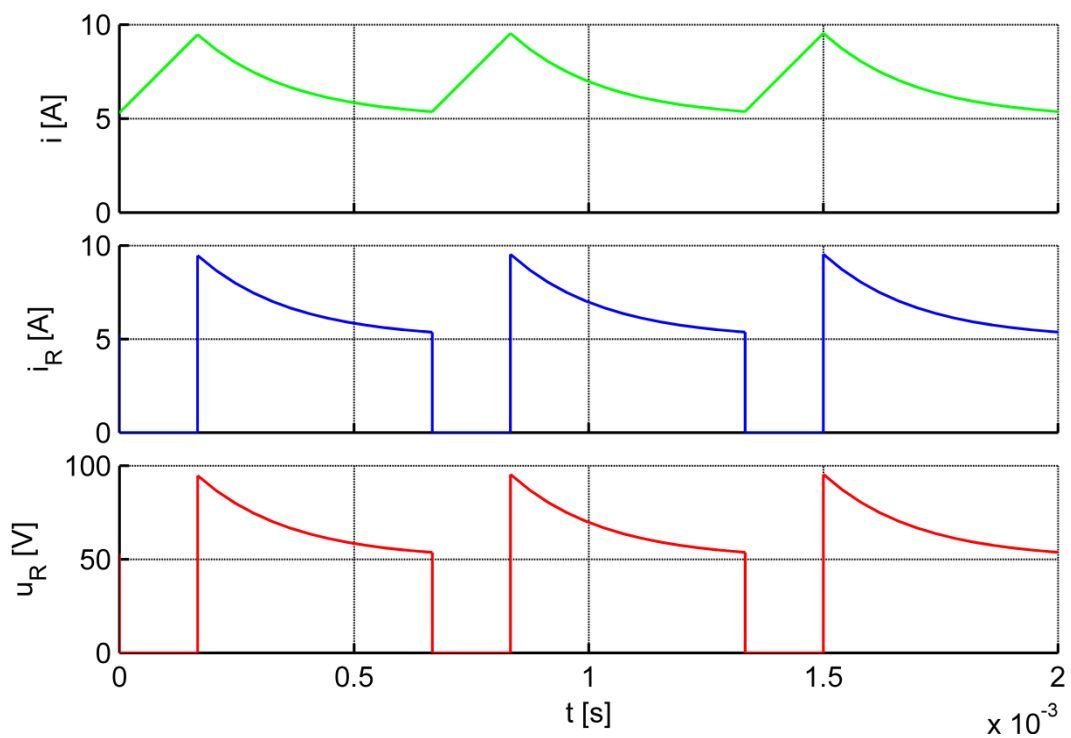
Při uvažování ideálně vyhlazeného proudu lze opět vyjádřit vztah pro ekvivalentní odpor R_e [1]:

$$UI_d T = RI_d^2 T_2 \Rightarrow I_d = \frac{UT}{RT_2} = \frac{U}{R_e} \Rightarrow R_e = R \frac{T_2}{T} = R(1 - z) \quad (1.6)$$

Trvale sepnutému spínači ($z = 1$) odpovídá ekvivalentní odpor rovný nule. V případě trvale vypnutého spínače ($z = 0$) je hodnota ekvivalentního odporu rovná hodnotě odporu R v obvodu měniče. Změnou poměrného sepnutí v intervalu $0 \leq z \leq 1$ lze tedy řídit velikost ekvivalentního odporu v intervalu $0 \leq R_e \leq R$. Změnu proudových a napěťových poměrů při změně poměrné doby sepnutí lze sledovat na *Obr. 10*. Zelená křivka opět znázorňuje průběh celkového proudu i , modrá průběh proudu odporem a červená průběh napětí na odporu. [1]



Obr. 9: Průběh napětí a proudu pro paralelní pulzní měnič odporu při $z = 0,75$



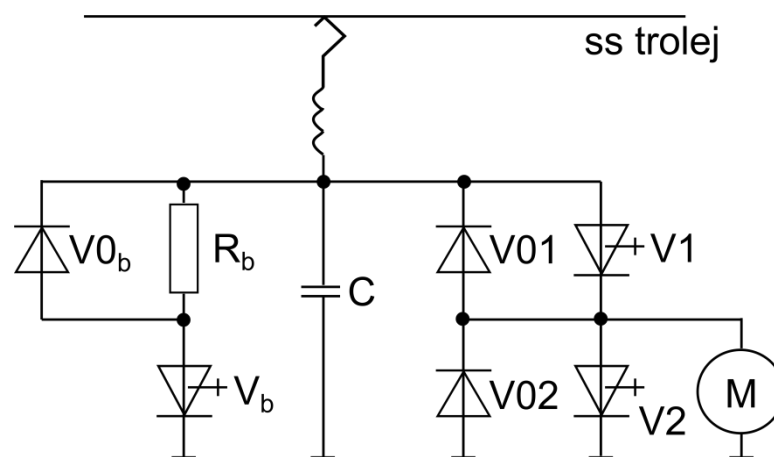
Obr. 10: Průběh napětí a proudu pro paralelní pulzní měnič odporu při $z = 0,25$

1.4 Praktická aplikace

Pulzní měniče lze využít například ve výkonovém obvodu stejnosměrného pohonu napájeného ze stejnosměrné sítě. Schéma lze vidět na Obr. 11. Dioda V01 a tranzistor V2

společně tvoří pulzní měnič pro snižování napětí, který zajišťuje chod v režimu pohon. Dioda V02 a tranzistor V1 společně tvoří pulzní měnič pro zvyšování napětí, který zajišťuje režim brzdění. Brzdit lze rekuperací energie do troleje nebo pomocí pulzně spínaného odporu. [4]

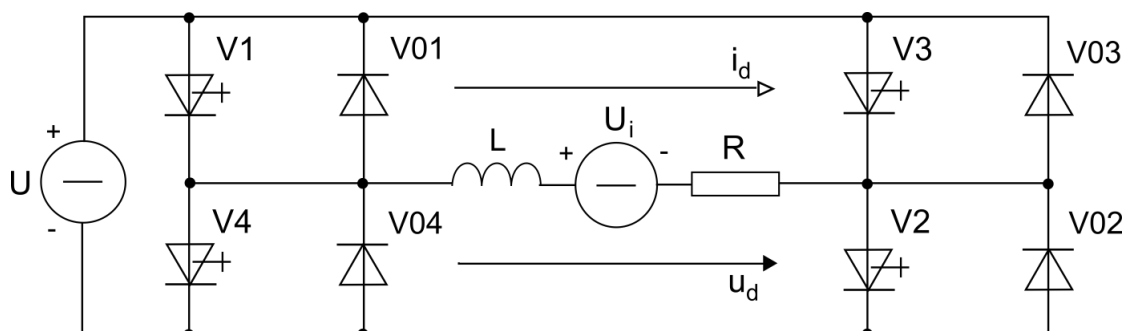
Při brzdění do odporu slouží tzv. brzdny odpor R_b k maření brzdny energie, která nemůže být přenesena zpět do troleje. Spínač V_b zde slouží k dvouhodnotové regulaci napětí na kondenzátoru C. Když je spínač V_b vypnutý, kondenzátor C se nabíjí, dokud napětí u_c nedosáhne horní hranice. V tom okamžiku se spínač V_b sepne a napětí na kondenzátoru klesá. Při dosažení spodní hranice se spínač opět vypne. [3]



Obr. 11: Praktické využití pulzních měničů ve výkonovém obvodu ss pohonu napájeného ze střídavé sítě [4]

1.5 Čtyřkvadrantový pulzní měnič

Schéma je na Obr. 12. Čtyřkvadrantový pulzní měnič používáme v případě, že potřebujeme na zátěž přivádět obě polaroty proudu i napětí.



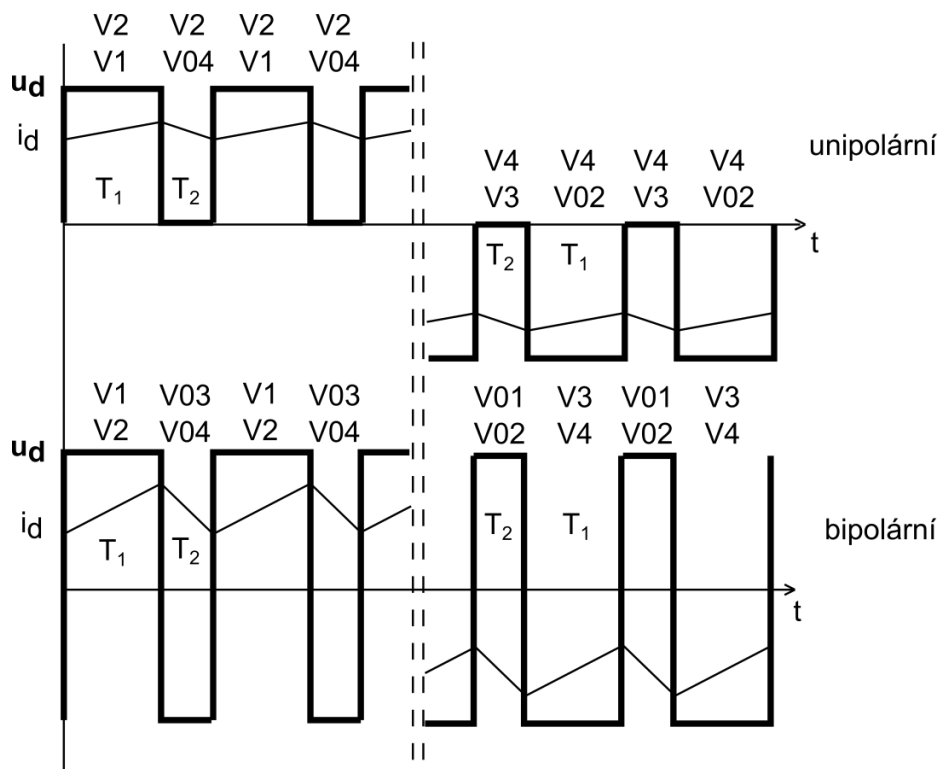
Obr. 12: Schéma čtyřkvadrantového pulzního měniče [4]

Střední hodnotu napětí lze opět určit podle vzorce:

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_1} U dt = \frac{T_1}{T} U = z \cdot U \quad (1.3)$$

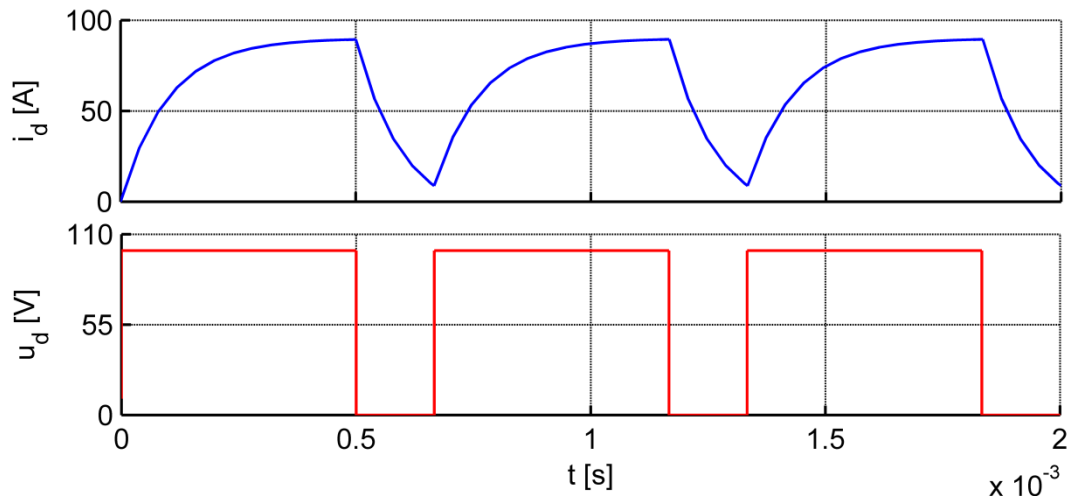
kde z je opět poměrná doba sepnutí opět nabývající hodnot $0 \leq z \leq 1$. Střední hodnota napětí se tedy pohybuje v mezích $0 \leq U_d \leq U$.

Čtyřkvadrantový měnič lze řídit dvěma způsoby, unipolárně či bipolárně. Při unipolárním řízení je na zátěž přiváděna pouze jedna polarita napětí, při bipolárním kladná i záporná amplituda napětí. Nevýhodou bipolárního řízení je, že způsobuje dvojnásobné zvlnění proudu zátěží (viz *Obr. 13*) [5]. Při vytvoření simulačního modelu čtyřkvadrantového měniče bylo použito řízení unipolární.



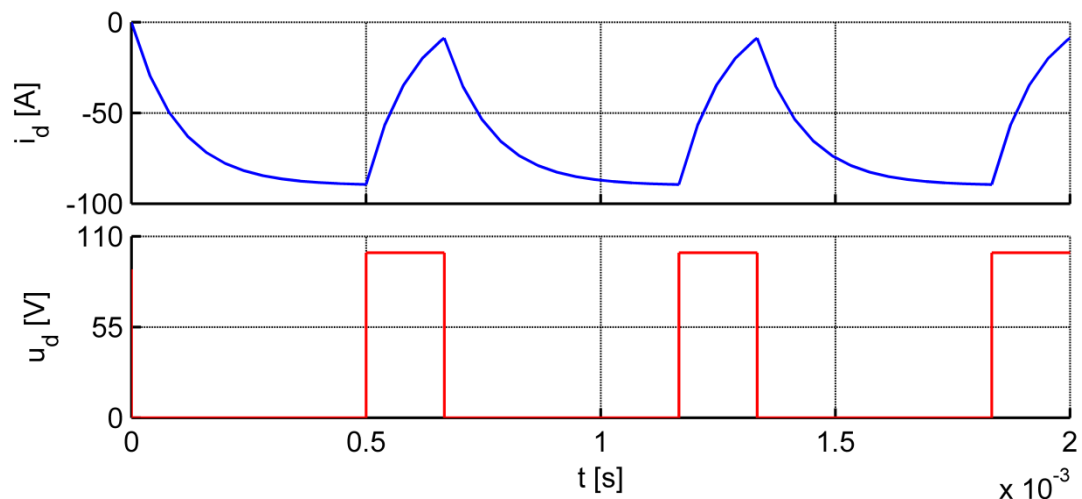
Obr. 13: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče při unipolárním a bipolárním řízení [5]

V prvním kvadrantu je na zátěži kladné napětí a teče jí kladný proud, jak lze vidět na *Obr. 14*. Řízení se provádí tak, že spínač V2 je trvale sepnut a na spínač V1 je přiváděn pulzní signál. Když je spínač V1 sepnut, je přes něj zátěž připojena ke zdroji napětí a proud protéká v kladném smyslu. Když je V1 vypnut, je zátěž vyzkratována přes nulovou diodu V04. První kvadrant odpovídá motorickému režimu. [5]



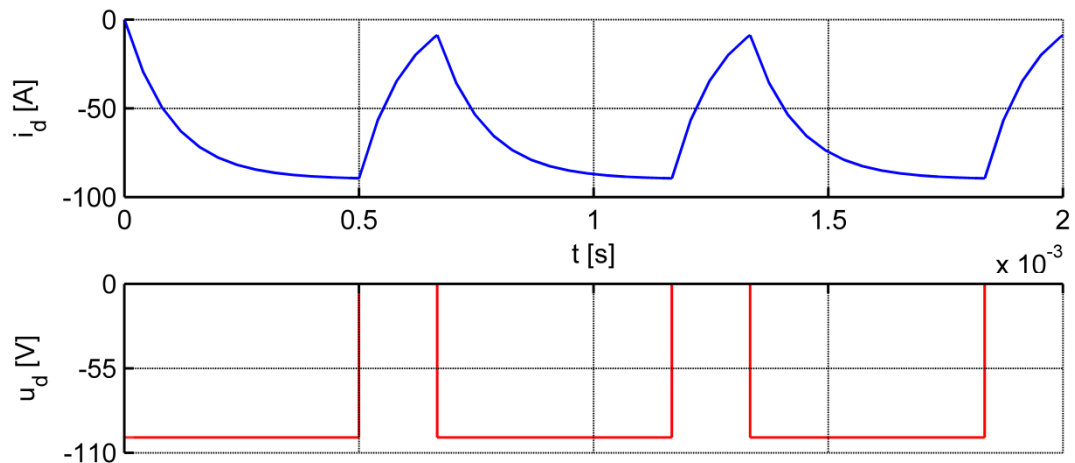
Obr. 14: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v prvním kvadrantu pro $z = 0,75$

Ve druhém kvadrantu je na zátěži kladné napětí, ale proud protéká v opačném směru. Průběhy znázorňují grafy na Obr. 15. Na spínač V3 je přiváděny spínací pulzy. Pokud je spínač sepnut, je zátěž zkratována přes diodu V01. Pokud je vypnut, je zátěž přes diody V01 a V02 připojena ke zdroji napětí. V případě druhého kvadrantu se jedná o režim generátorický. [5]



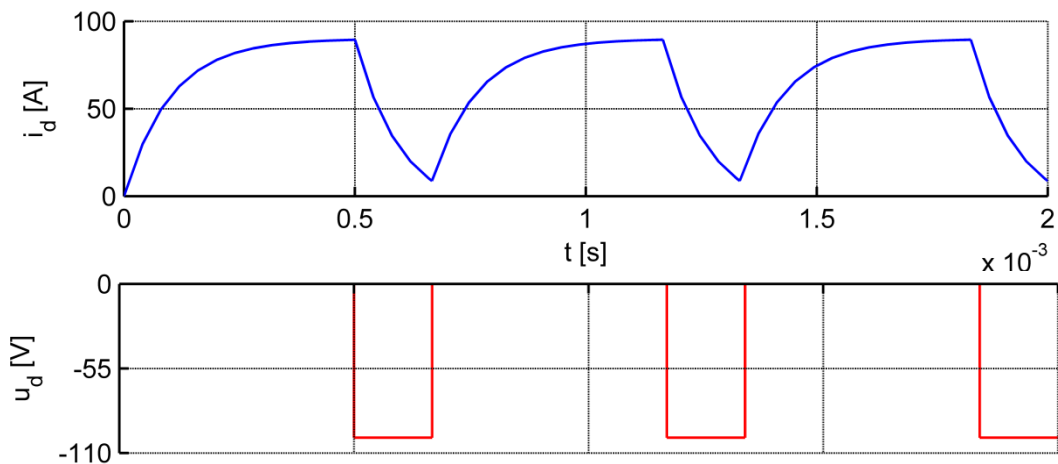
Obr. 15: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče ve druhém kvadrantu pro $z = 0,75$

Ve třetím kvadrantu je záporné napětí a stejně tak i proud, jak lze vidět na Obr. 16. Princip je analogický jako u prvního kvadrantu. Pulzně je spínán tranzistor V3, spínač V4 je trvale sepnut. V době, kdy je spínač V3 sepnut, je zátěž připojena ke zdroji napětí v záporném směru a zároveň jí protéká záporný proud. Když je spínač V3 vypnutý, je zátěž zkratována přes diodu V02. Opět se jedná o režim motorický. [5]



Obr. 16: Průběhy proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče ve třetím kvadrantu pro $z = 0,75$

Čtvrtému kvadrantu odpovídá kladný smysl proudu a záporný smysl napětí, jak znázorňují grafy na Obr. 17. Pulzním signálem řídíme spínání tranzistoru V1. Když je sepnutý, je zátěž zkratována přes diodu V03. Když je spínač V1 vypnutý, je zátěž připojena přes diody V03 a V04 ke zdroji napětí v záporném smyslu a proud jí protéká ve směru kladném. V tomto případě jde o generátorický režim. [5]



Obr. 17: Průběhy proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče ve čtvrtém kvadrantu pro $z = 0,75$

2 Popis prostředí Matlab/Simulink/PLECS

2.1 Základní struktura systému

Matlab se využívá především pro modelování, matematické výpočty či měření a analýzu dat a jejich následnou vizualizaci. Úkony se provádí pomocí příkazové řádky, přičemž napsaný příkaz je ihned proveden. Při požadavku provedení soustavy příkazů najednou lze vytvořit tzv. skript, který se pak provede vypsáním jména skriptu na příkazový řádek. Součástí Matlabu jsou tzv. m-funkce, což jsou vlastně textové soubory, ve kterých jsou uloženy příkazy a funkce. Uživatel může vytvářet vlastní m-funkce a tím množinu příkazů zvětšit. [6]

Základní verzi Matlabu lze doplnit tzv. toolboxy. To jsou knihovny funkcí zaměřené na specifické vědní oblasti. Využívají se k řešení problémů v konkrétních oblastech, jako je například statistika nebo práce s neuronovými sítěmi. [7] Dále lze Matlab rozšířit o funkční nadstavby, které jsou většinou ovládány odlišným způsobem. K takovým patří například Simulink. [6]

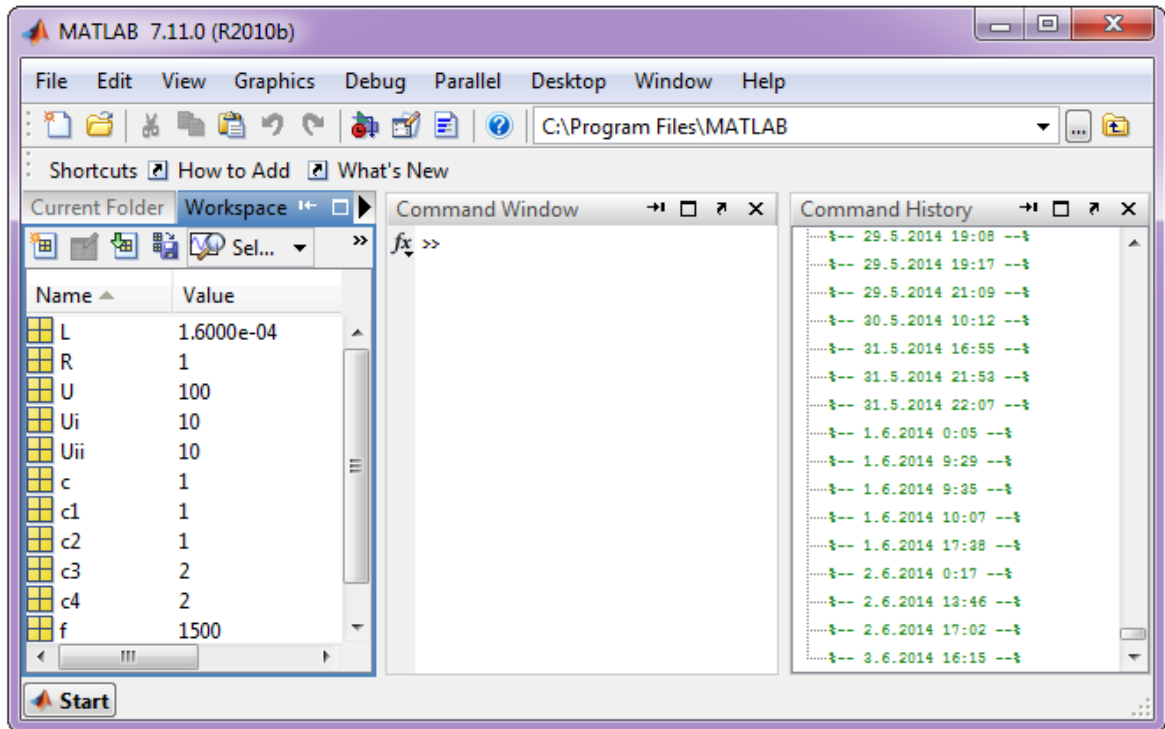
2.2 Pracovní plocha Matlabu

Pracovní plochu Matlabu lze vidět na *Obr. 18*. Obvykle sestává ze tří oken. Největší z nich, nazvané Command Window, slouží k zápisu příkazů, které jsou ihned prováděny. Zároveň se zde zobrazují systémová hlášení a odezva Matlabu. Po straně jsou další dvě okna. První z nich lze přepínat mezi Workspace a Current Folder. V okně Workspace se zobrazují použité proměnné, Current Folder zobrazuje seznam souborů v aktuálním adresáři. Poslední zobrazené okno má název Command History a jak již název napovídá, slouží k zobrazení historie příkazů zapsaných v Command Window. [7]

2.3 Simulink

Jak již bylo zmíněno výše, Simulink je nadstavbou rozšiřující Matlab. Na rozdíl od Matlabu však nepracuje s příkazovým řádkem, nýbrž s příkazy a funkcemi v podobě grafických bloků. Tyto bloky jsou uspořádány do knihoven podle oblastí jejich využití. Simulink slouží k simulaci chování dynamických systémů v závislosti na čase. [7]

Vytváření modelů je principiálně poměrně snadné. V okně Simulink Library Browser jsou v jednotlivých knihovnách umístěny potřebné grafické bloky, které se přetáhnou do okna modelu. Tam jsou pospojovány pomocí myši. Tyto bloky lze rozkliknout a upravit tak jejich parametry. Jedním z nejpoužívanějších bloků je např. Scope, jehož rozkliknutím se zobrazí časové průběhy sledovaných veličin. [7]



Obr. 18: Pracovní plocha Matlabu

2.4 PLECS

PLECS je nástrojem pro detailní simulace výkonových elektronických systémů. Je dostupný jako samostatný program nebo jako speciální knihovna doplňující Simulink. Obsahuje knihovny pro různá technická odvětví, například elektrické, tepelné či magnetické. [8]

Pro vytvoření simulačních modelů byl použit PLECS jako knihovna Simulinku. Základem je blok PLECS Circuit, který je vložen do okna modelu v Simulinku. Tento blok zajišťuje komunikaci mezi vnějším Simulinkem a vnitřním PLECSem pomocí portů In a Out. Pomocí PLECSu byly vytvořeny samotné obvody měničů. Byly použity součástky z knihovny Electrical Components.

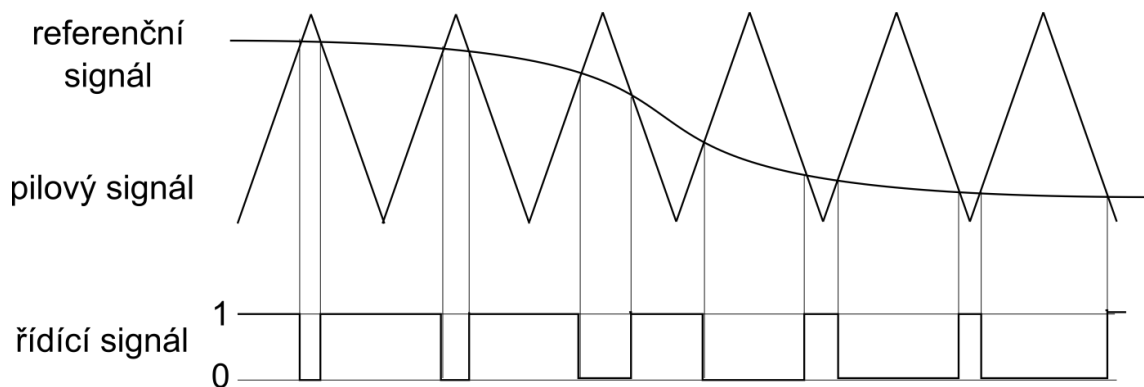
3 Simulační modely pulzních měničů

V této kapitole budou řešeny simulační modely jednotlivých typů pulzních měničů. Cílem kapitoly je ukázat, jaký vliv má změna různých parametrů na tvar výstupního signálu, tedy proudu a napětí na zátěži jednotlivých typů pulzních měničů.

3.1 Pulzní měnič pro snižování napětí

3.1.1 Změna parametrů

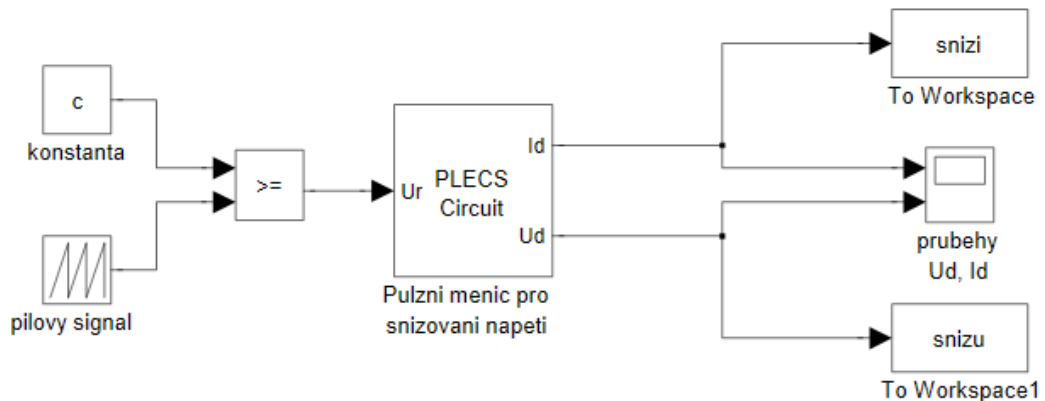
V simulačních modelech lze měnit parametry jednotlivých prvků v samotném obvodu měniče a také v jeho řídicím obvodu. Pro realizaci řízení tranzistorů a pro vizualizaci výstupních signálů byl použit Simulink. Řídicí obvod byl realizován pomocí porovnání pilového signálu s konstantou, princip vzniku řídicího signálu je naznačen na *Obr. 19*. V praxi je místo konstanty pilový signál porovnáván např. s výstupem z regulátoru, který mění referenční hodnotu a tím dochází ke změně poměrné doby sepnutí. Na obrázku je vyobrazeno porovnání se symetrickou pilou, v simulačních modelech byla použita pila nesymetrická. Princip porovnání však zůstává stejný.



Obr. 19: Princip vzniku řídicího signálu – porovnání pilového signálu s referenčním signálem

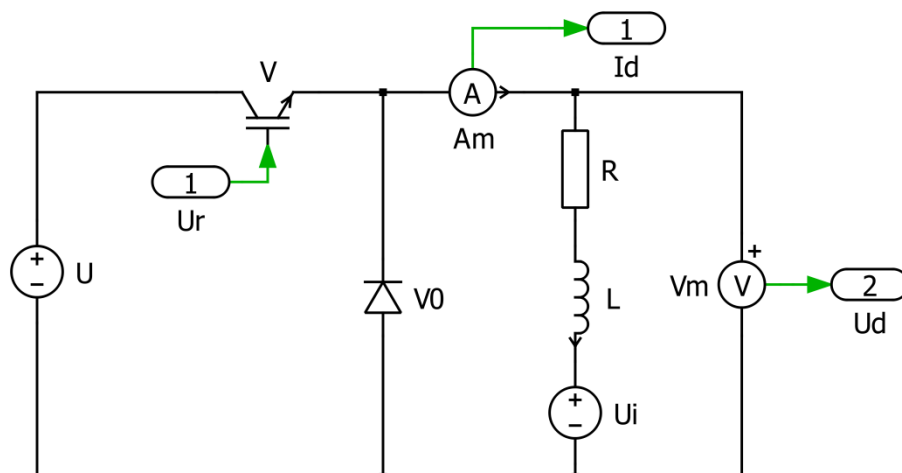
Pro sestavení řídicího obvodu byly vybrány bloky Repeated Sequence a Constant. V řídicím obvodu lze měnit například frekvenci spínání tranzistoru a délku poměrné doby sepnutí. Změna spínací frekvence se provádí rozkliknutím bloku, objeví se okno Source Block Parameters a v něm se změní hodnota periody v kolonce Time Values. Poměrnou dobu sepnutí lze změnit rozkliknutím bloku Konstanta, kde se v kolonce Constant value nastaví referenční hodnota, která bude porovnávána s pilovým signálem. Pila nabývá hodnot 0 až 1, konstantu je nutno nastavit na stejnou hodnotu jako poměrnou dobu sepnutí (pro $z = 0,25$ je nutno nastavit $c = 0,25$ apod.).

Pro zobrazení průběhů proudu a napětí byl použit blok Scope. Schéma lze vidět na *Obr. 20*. Pro vygenerování a úpravu grafů byl použit blok To Workspace. Při spuštění simulace tento blok zaznamenává hodnoty daného signálu jako proměnnou, se kterou lze dále pracovat v prostředí Matlab. Lze např. vytvořit m-skript, který použije načtenou proměnnou k vykreslení grafu. Vytvořený graf se zobrazí v okně Figure, kde je možno jej nadále upravovat, například barvu a tloušťku křivky, nastavení a popisky os či legendu.



Obr. 20: Řídící obvod a vizualizace výstupů simulace pro pulzní měnič pro snižování napětí v prostředí Simulink

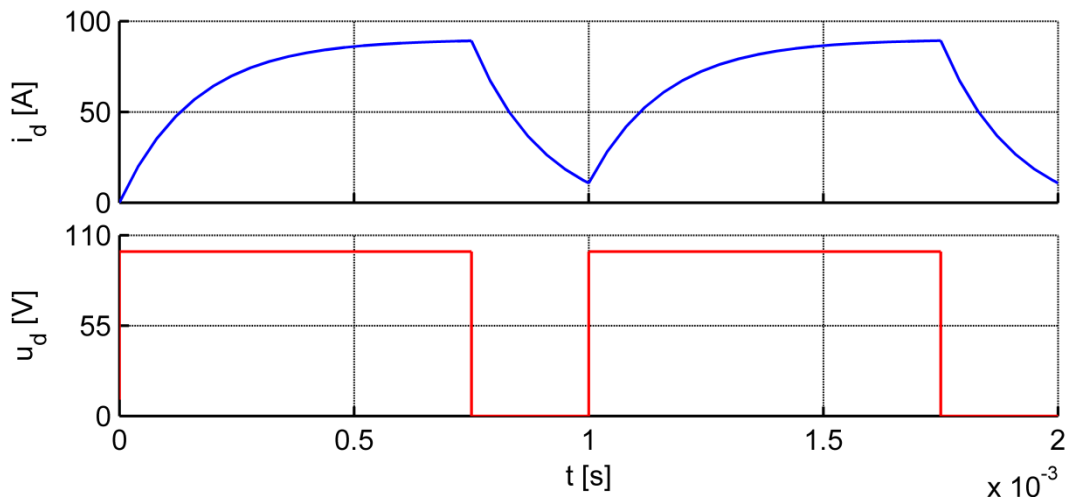
Obvod měniče byl simulován v PLECSu. Po rozkliknutí bloku PLECS Circuit se objeví okno s obvodem měniče, který je vidět na *Obr. 21*. Dvojklikem na jednotlivé součástky je možné upravovat jejich parametry. Po rozkliknutí součástky se objeví okno Block Parameters, ve kterém je možné měnit hodnotu daného prvku obvodu.



Obr. 21: Schéma obvodu pulzního měniče pro snižování napětí v prostředí PLECS

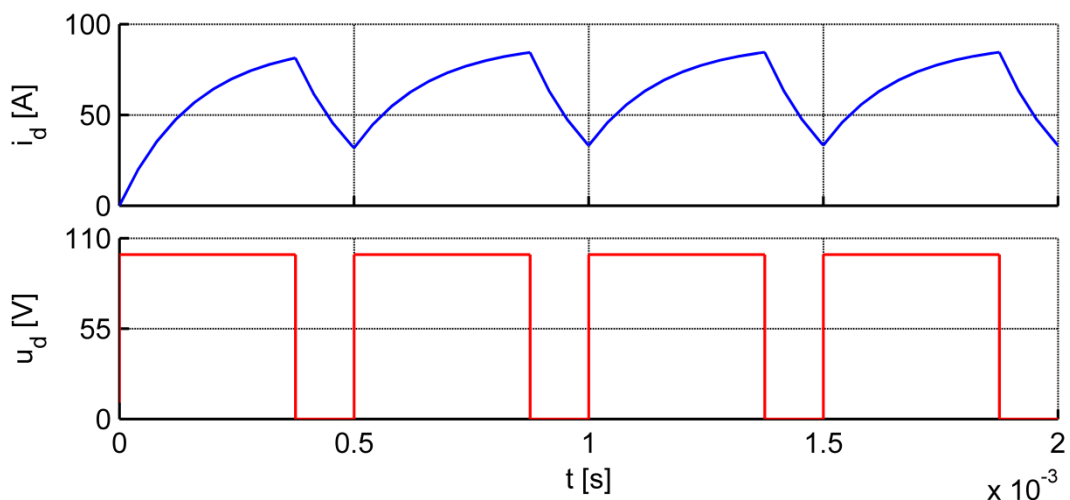
3.1.2 Změna spínací frekvence

Změnou frekvence pilového signálu dojde ke změně frekvence spínání tranzistoru. Jak lze vidět na *Obr. 22*, pokud je frekvence příliš malá, je mezi spínacími pulzy velká prodleva. Proud má velké zvlnění a může dojít k přerušení proudu. V tomto případě se tak nestalo, proto napětí na zátěži nabývá pouze hodnot rovných nule nebo napětí zdroje. Simulace proběhla při nastavení parametrů: $z = 0,75$, $R = 1 \Omega$, $L = 0,05 \text{ mH}$, $U_i = 10 \text{ V}$.



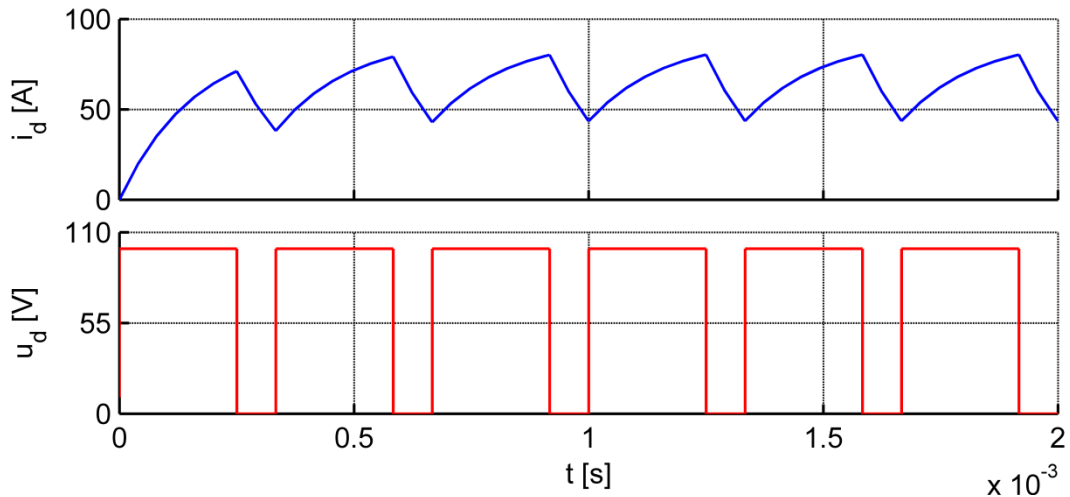
Obr. 22: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro snižování napětí při $f = 1000 \text{ Hz}$

Proudové a napět'ové poměry při zvýšení spínací frekvence na 2000 Hz ukazuje *Obr. 23*. Frekvence se zvětšila dvojnásobně, proto je pulzů dvakrát více a tím dojde ke zmenšení zvlnění proudu. Změna frekvence však nemá vliv na velikost střední hodnoty proudu. Nemá též vliv na hodnoty, kterých nabývá průběh napětí na zátěži, projeví se však stejně jako u proudu dvojnásobným zhuštěním pulzů a tím poloviční spínací periodou.



Obr. 23: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro snižování napětí při $f = 2000 \text{ Hz}$

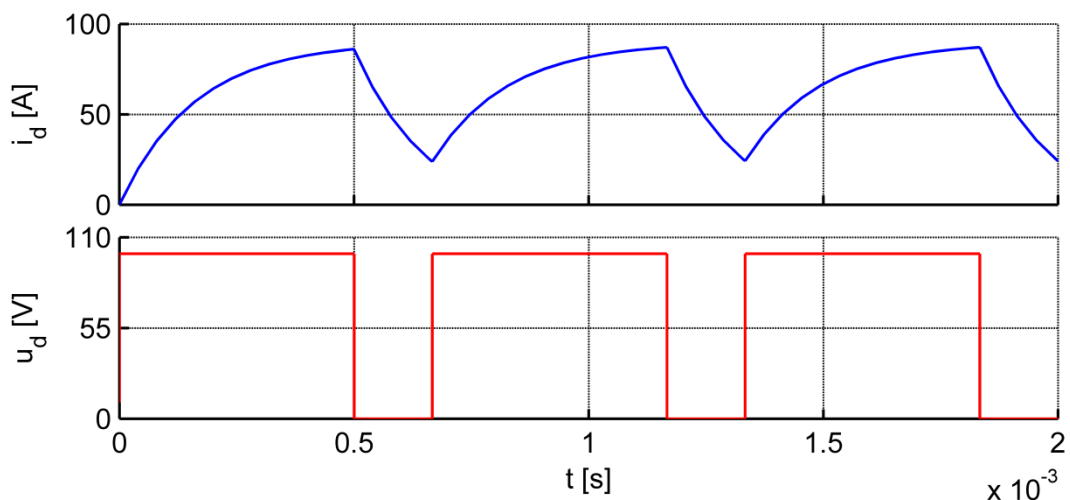
Další zvýšení hodnoty spínací frekvence, tentokrát na 3000 Hz, ukazuje *Obr. 24*. Jak lze vidět, zvlnění proudu je ještě menší a pulzy jsou třikrát hustější oproti prvnímu případu při $f = 1000$ Hz. Perioda spínání je tudíž třikrát kratší. Stejně vlastnosti vykazuje též průběh napětí.



Obr. 24: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro snižování napětí při $f = 3000$ Hz

3.1.3 Změna poměrného sepnutí

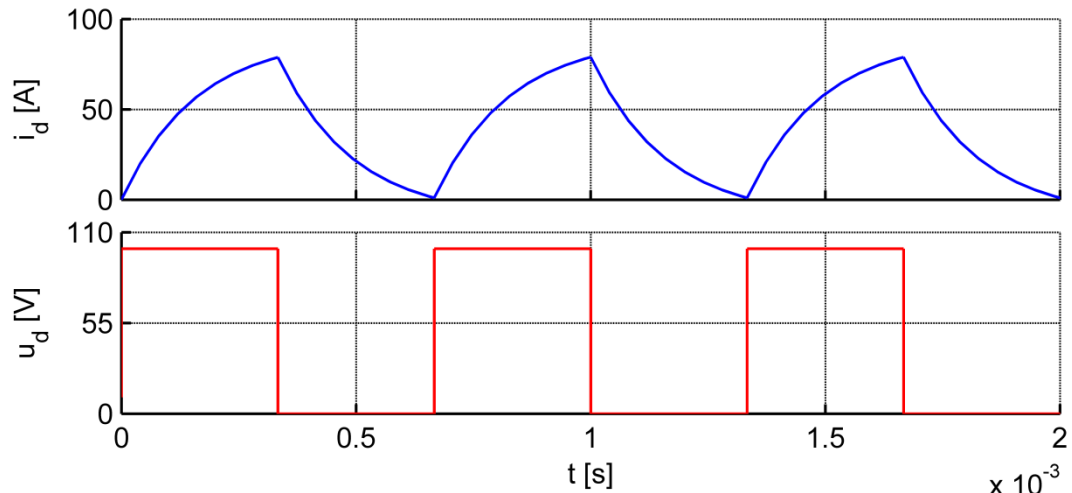
Na *Obr. 25* lze vidět výstup simulace provedené při nastavení parametrů: $f = 2000$ Hz, $R = 1 \Omega$, $L = 0,16$ mH, $U_i = 10$ V, $z = 0,75$.



Obr. 25: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro snižování napětí při $z = 0,75$

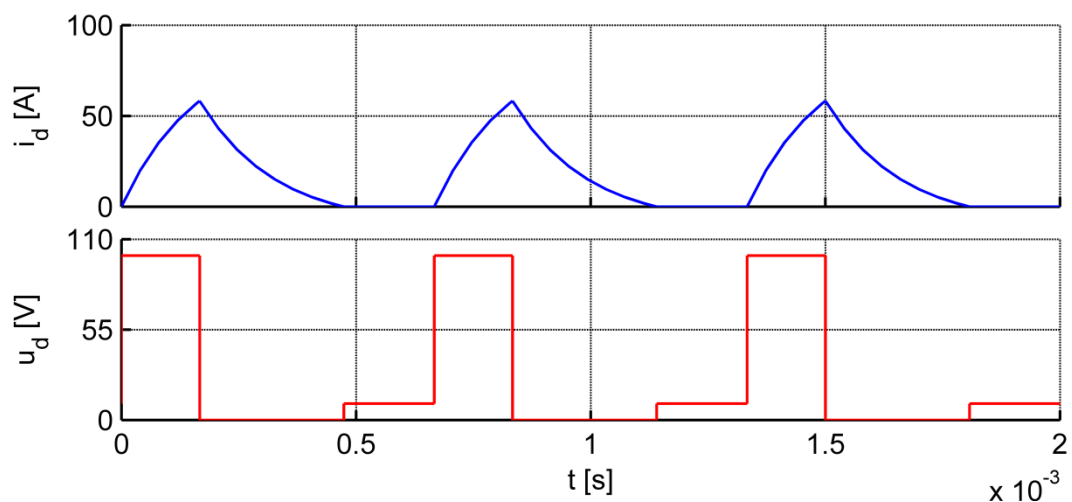
Jak ukazuje *Obr. 26*, při zmenšení hodnoty poměrné doby sepnutí na $z = 0,5$ dojde ke zkrácení doby, kdy je sepnut tranzistor (proud roste) a naopak prodloužení doby, kdy je tranzistor vypnut a proud teče nulovou diodou (proud klesá). Spínací perioda zůstává

konstantní. Jak lze vyčíst ze vztahů 1.1 a 1.2 (str. 11), tato změna ovlivňuje střední hodnotu napětí na zátěži i střední hodnotu protékajícího proudu. Současně ovlivňuje též zvlnění proudu.



Obr. 26: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro snižování napětí při $z = 0,5$

Obr. 27 ukazuje, že změnou poměrné doby sepnutí na $z = 0,25$ nastal při daných parametrech provoz měniče s přerušovaným proudem. To se projeví také na průběhu napětí na zátěži, v intervalech přerušování proudu se napětí na zátěži rovná hodnotě indukovaného napětí.

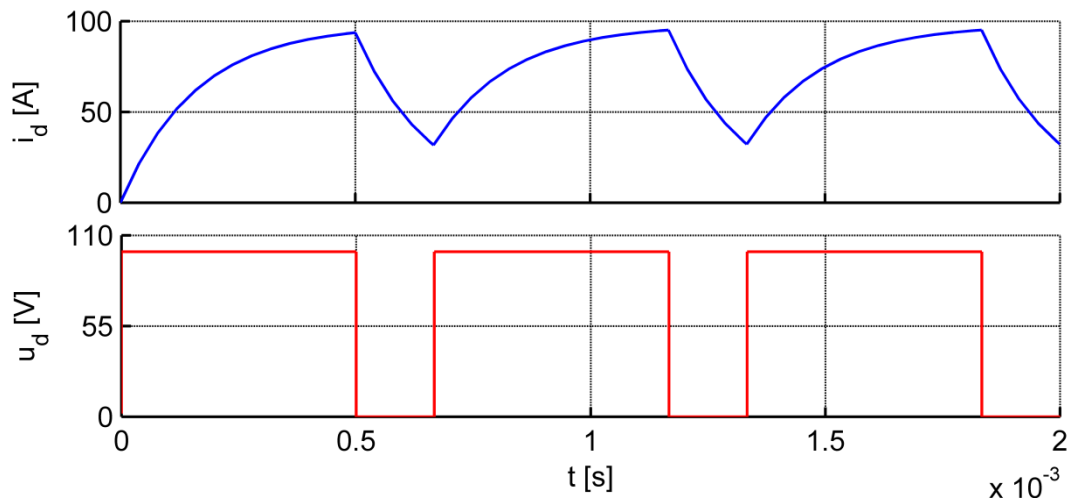


Obr. 27: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro snižování napětí při $z = 0,25$

3.1.4 Změna indukovaného napětí

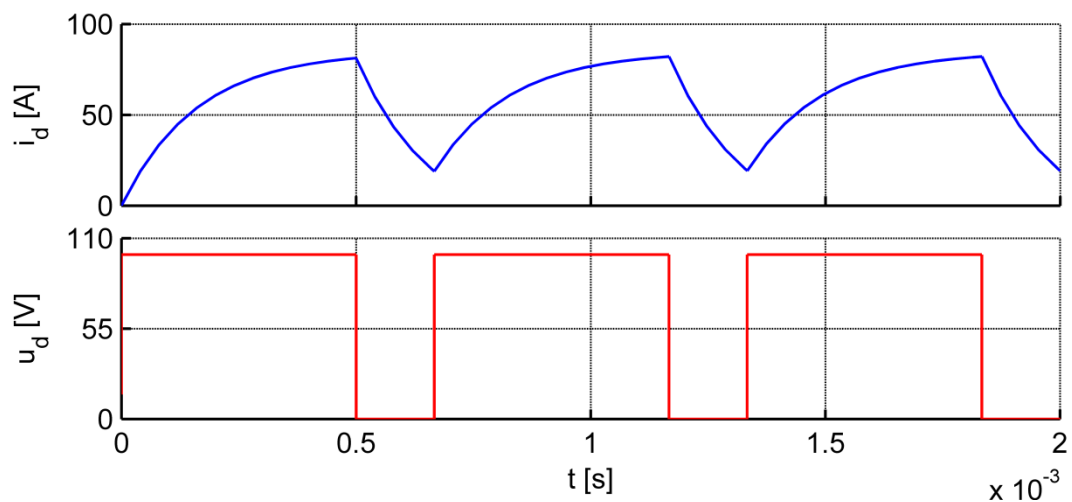
Obr. 28 ukazuje výsledek simulace, která proběhla při nastavení parametrů: $z = 0,75$, $f = 1500$ Hz, $L = 0,16$ mH, $U_i = 2$ V. Jelikož byla hodnota odporu zátěže nastavena na

$R = 1 \Omega$ a hodnota indukčnosti je poměrně malá, je maximální hodnota proudu menší oproti napětí zdroje přibližně o danou hodnotu U_i .



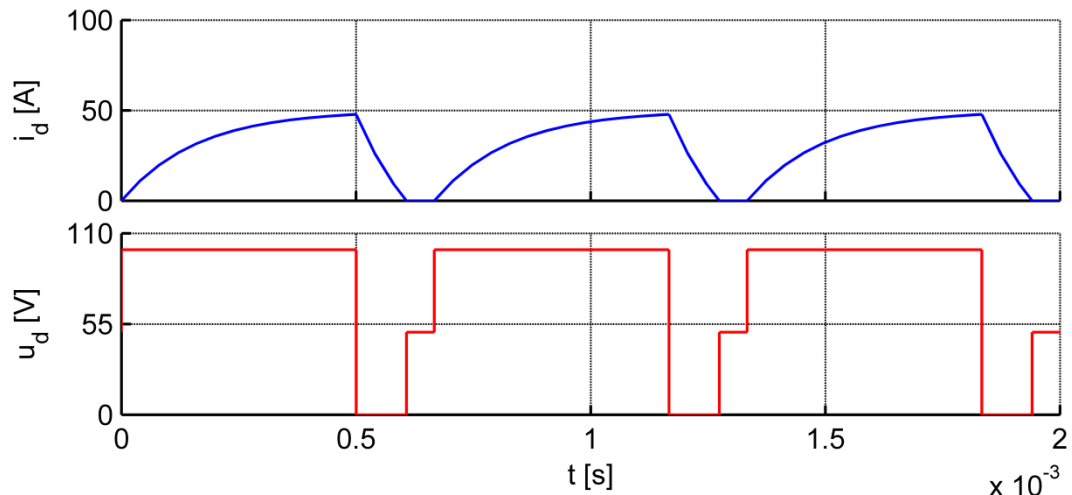
Obr. 28: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro snižování napětí při $U_i = 2 \text{ V}$

Jak vyjadřuje vztah 1.2 (str. 11), zvětšením hodnoty indukovaného napětí zátěže dojde ke zmenšení střední hodnoty proudu, jak lze též vidět na Obr. 29. Změna indukovaného napětí nemá při nepřerušovaném proudu žádný vliv na napětí na zátěži.



Obr. 29: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro snižování napětí při $U_i = 15 \text{ V}$

Pokud je hodnota indukovaného napětí příliš velká, dojde k přílišnému poklesu střední hodnoty proudu a může dojít k jeho přerušování. V intervalech přerušování proudu je napětí na zátěži rovné hodnotě indukovaného napětí, jak lze vidět na Obr. 30.



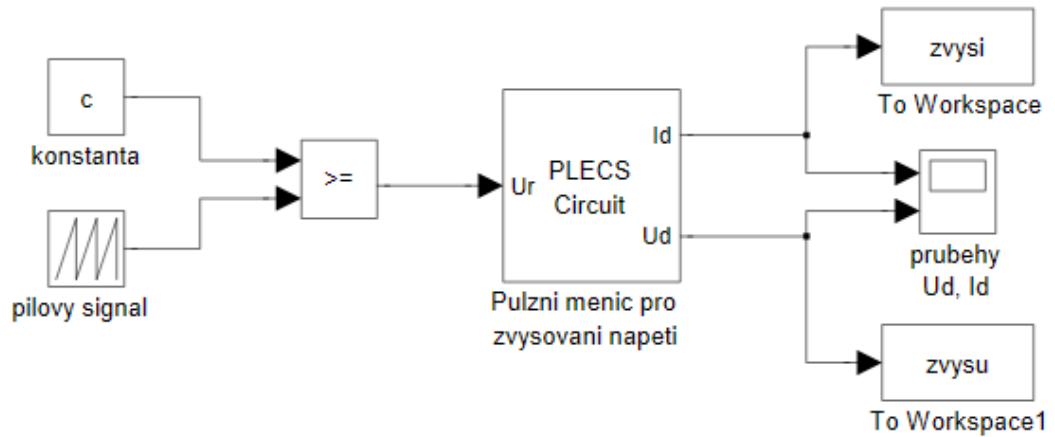
Obr. 30: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro snižování napětí při $U_i = 50 \text{ V}$

3.2 Pulzní měnič pro zvyšování napětí

3.2.1 Změna parametrů

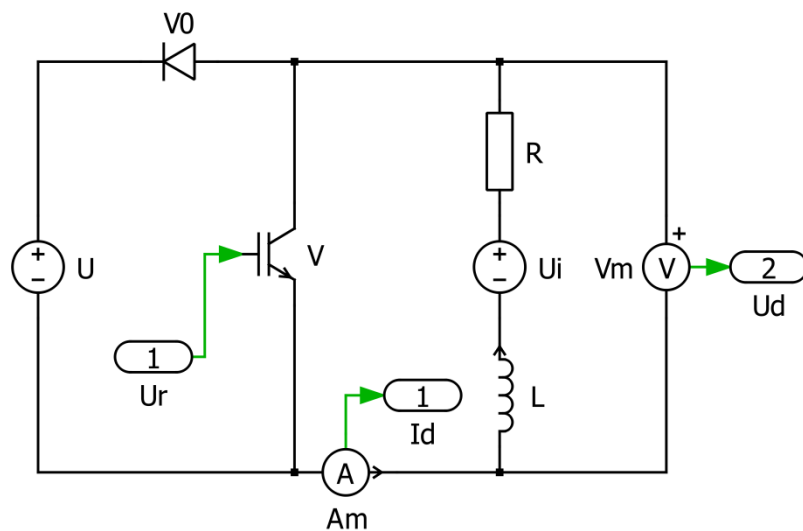
Řídicí obvod tranzistoru byl realizován v prostředí Simulinku pomocí koincidence pilového signálu s referenční hodnotou, v tomto případě konstantní. Pilový signál byl realizován blokem Repeated Sequence, konstanta blokem Constant a jejich vzájemným porovnáním vznikl řídicí signál tranzistoru, princip jeho vzniku je popsán v oddílu 3.1.1 (str. 24). Jak je vidět na Obr. 31, Simulink byl použit též k zobrazení a zpracování výstupů. Pro vygenerování grafu byl opět použit blok To Workspace, který zaznamená výstupní signál jako proměnnou, pomocí které lze posléze průběh výstupní veličiny prostřednictvím m-skriptu vykreslit do grafu.

V rámci řídicího obvodu lze měnit frekvenci pilového signálu a hodnotu konstanty. Rozkliknutím bloku pilového signálu se objeví okno Source Block Parameters a změnou hodnoty periody pily v kolonce Time Values dojde ke změně spínací frekvence tranzistoru. Po rozkliknutí bloku konstanty se opět zobrazí okno Source Block Parameters, ve kterém lze v kolonce Constant value změnit hodnotu konstanty. Tím se změní doba, po kterou je okamžitá hodnota pilového signálu menší než hodnota konstanty, tedy i poměrná doba sepnutí tranzistoru.



Obr. 31: Řídící obvod a vizualizace výstupů simulace pro pulzní měnič pro zvyšování napětí v prostředí Simulink

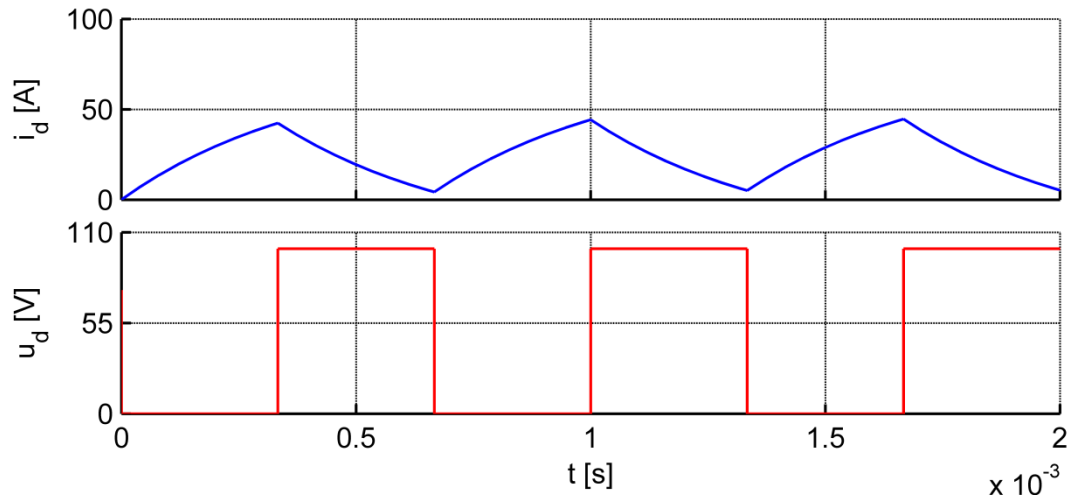
Obvod pulzního měniče pro zvyšování napětí byl simulován v prostředí PLECS. Po rozkliknutí bloku PLECS Circuit se zobrazí okno, ve kterém je sestaven obvod měniče, který je vidět na Obr. 32. Při rozkliknutí jednotlivých součástí se objeví okno Block Parameters, ve kterém je možno upravovat hodnotu daného parametru, např. u indukčnosti v políčku Inductance, u indukovaného napětí v políčku Voltage.



Obr. 32: Schéma obvodu pulzního měniče pro zvyšování napětí v prostředí PLECS

3.2.2 Změna indukčnosti

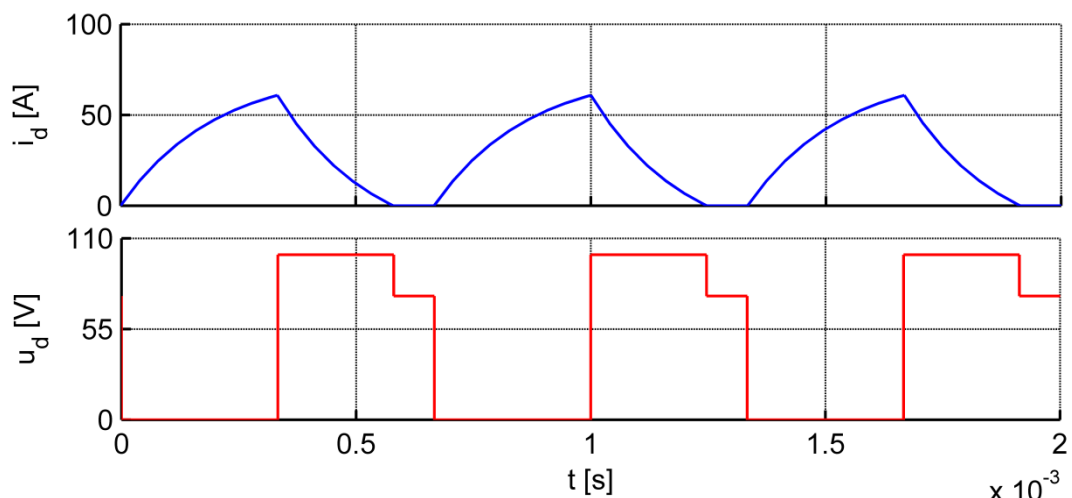
Velikost indukčnosti zátěže má vliv na zvlnění proudu, nikoli však střední hodnotu proudu či napětí. Čím je indukčnost větší, tím menší je zvlnění proudu. Na Obr. 33 lze vidět průběhy napětí a proudu simulací provedenou při nastavení parametrů: $z = 0,5$, $f = 1500$ Hz, $R = 1 \Omega$, $U_i = 75$ V, $L = 0,4$ mH.



Obr. 33: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro zvyšování napětí při $L = 0,4 \text{ mH}$

Pokud je hodnota indukčnosti příliš malá, může být zvlnění tak velké, že dojde k přerušovanému proudu. Průběhy při zmenšení indukčnosti na hodnotu $L = 0,2 \text{ mH}$ ukazuje

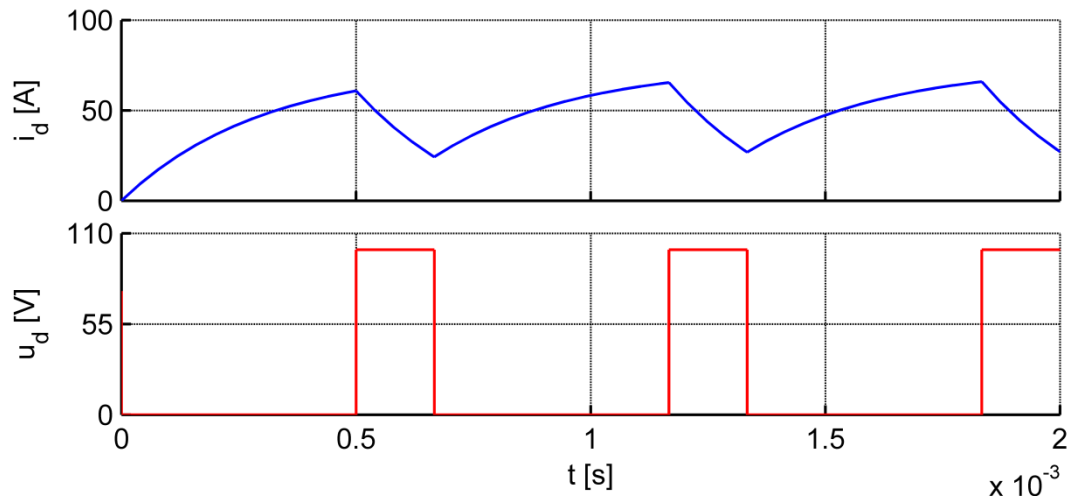
Obr. 34. V intervalech přerušování proudu je napětí na zátěži rovno indukovanému napětí.



Obr. 34: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro zvyšování napětí při $L = 0,2 \text{ mH}$

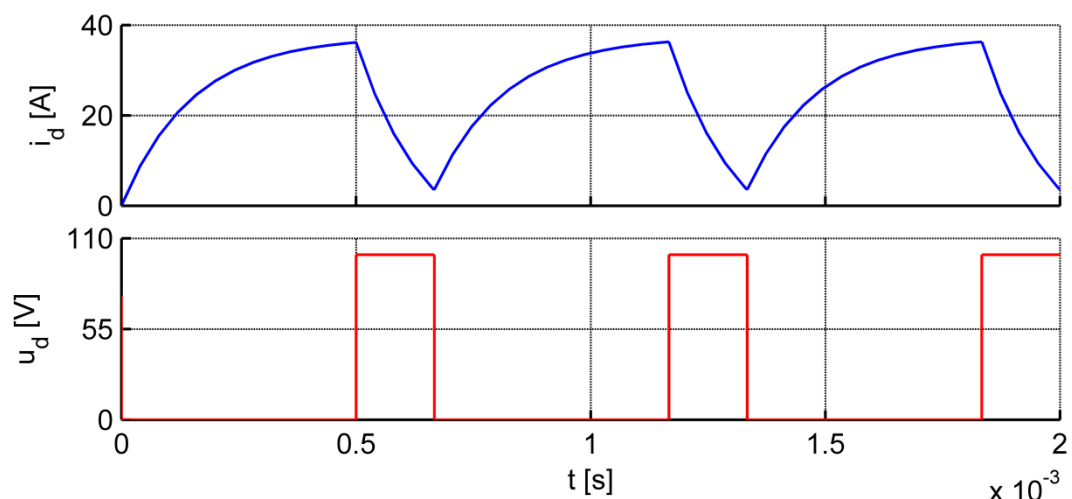
3.2.3 Změna odporu

Jak lze odvodit ze vzorce 1.4 (str. 13), má změna odporu vliv na střední hodnotu proudu protékajícího zátěží. Čím je hodnota odporu větší, tím menší bude střední hodnota proudu. Jelikož je napětí odporem děleno, i velice malá změna odporu způsobí velkou změnu protékajícího proudu. Simulace byla provedena při nastavení parametrů: $z = 0,75$, $f = 1500 \text{ Hz}$, $L = 0,3 \text{ mH}$, $U_i = 75 \text{ V}$. Na Obr. 35 jsou vidět průběhy proudu a napětí na zátěži při nastavené hodnotě odporu $R = 1 \Omega$.



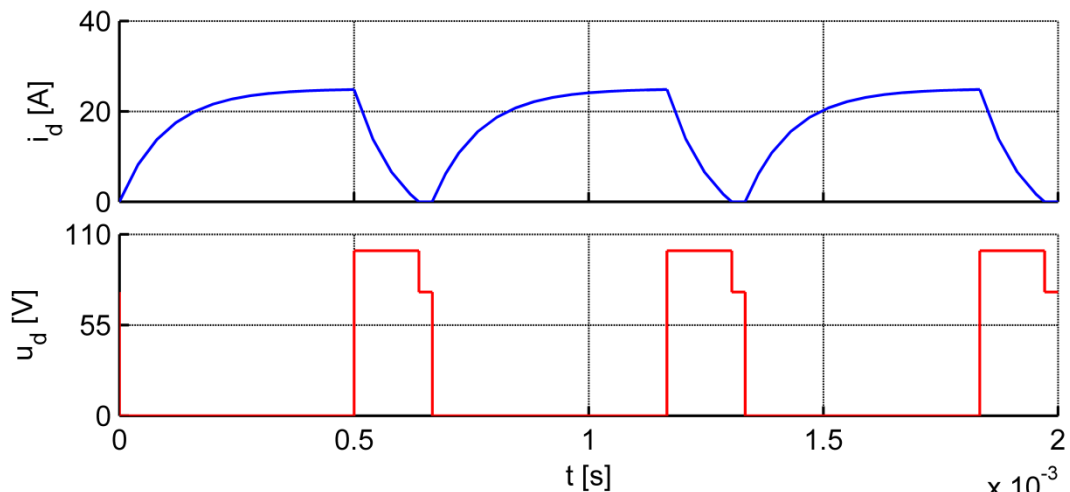
Obr. 35: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro zvyšování napětí při $R = 1 \Omega$

Jak lze vidět na Obr. 36, zvětšením odporu zátěže na hodnotu $R = 2 \Omega$ dojde k poklesu střední hodnoty proudu protékajícího zátěží. Jelikož tímto zvětšením nedošlo k přerušení proudu, změna hodnoty odporu se na průběhu napětí na zátěži nijak neprojevila.



Obr. 36: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro zvyšování napětí při $R = 2 \Omega$

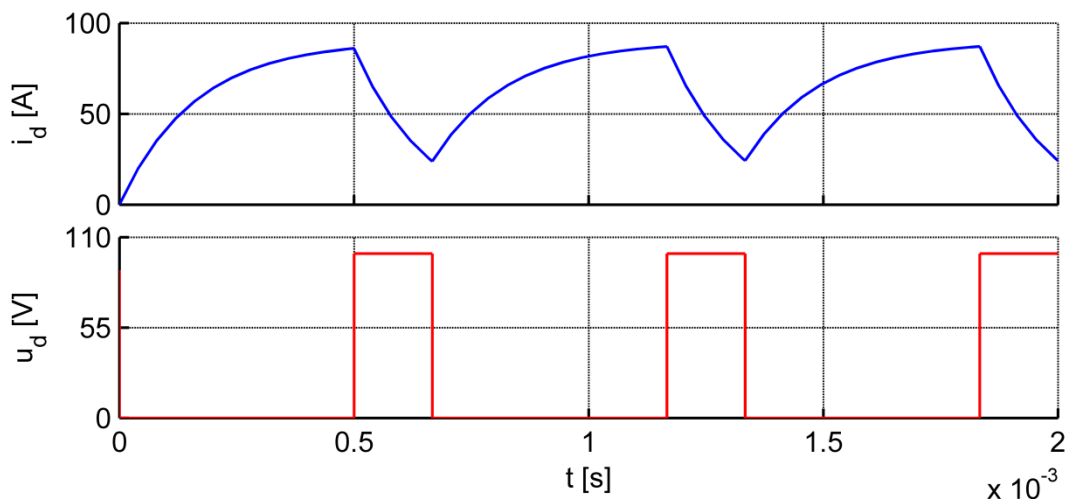
Obr. 37 znázorňuje průběh proudu zátěží a napětí na zátěži při dalším zvětšení hodnoty odporu, tentokrát na $R = 3 \Omega$. Nejenže došlo k dalšímu snížení střední hodnoty proudu, ale vlivem zvlnění proudu navíc došlo k jeho přerušení. Tato změna odporu se tedy projeví také na průběhu napětí, protože v okamžicích nulového proudu klesne jeho hodnota na hodnotu indukovaného napětí.



Obr. 37: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro zvyšování napětí při $R = 3 \Omega$

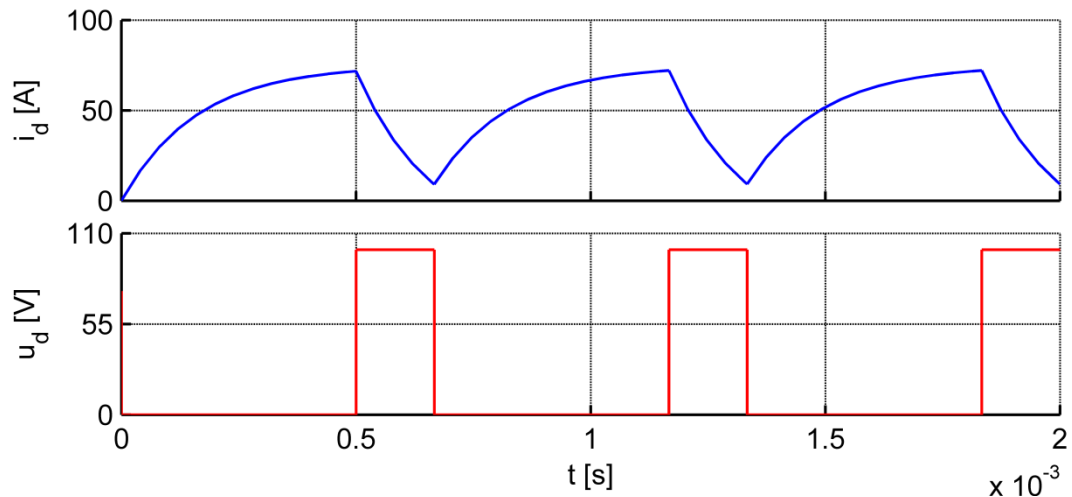
3.2.4 Změna indukovaného napětí

Narozdíl od pulzního měniče pro snižování napětí, kde byla maximální hodnota proudu snížena oproti napájecímu napětí přibližně o hodnotu indukovaného napětí, u pulzního měniče pro zvyšování napětí se maximální hodnota proudu se zvětšujícím se indukovaným napětím zvětšuje. Obr. 38 ukazuje výsledek simulace provedené při nastavení parametrů: $z = 0,75$, $f = 1500 \text{ Hz}$, $R = 1 \Omega$, $L = 0,16 \text{ mH}$, $U_i = 90 \text{ V}$.



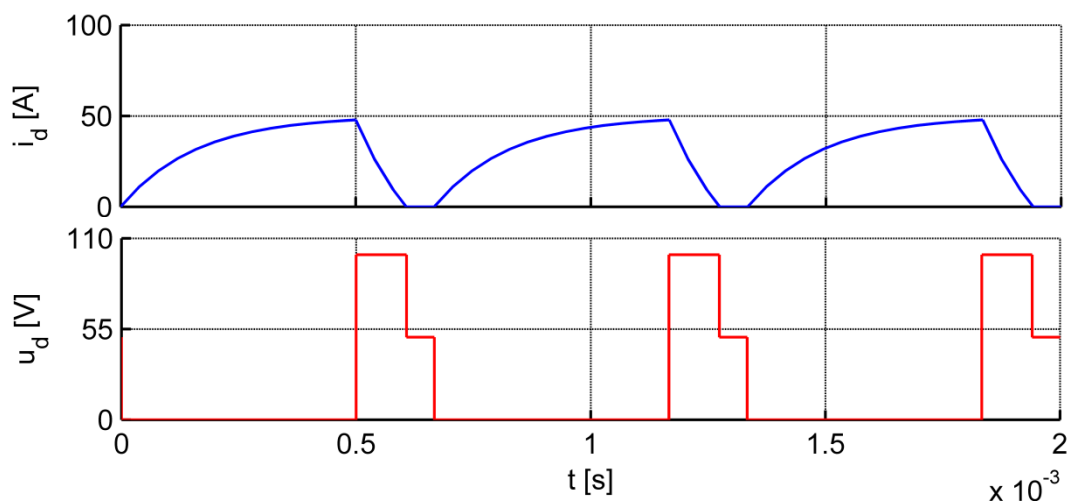
Obr. 38: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro zvyšování napětí při $U_i = 90 \text{ V}$

Jak se změní proudové a napěťové poměry na zátěži při snížení hodnoty indukovaného napětí na $U_i = 75 \text{ V}$ ukazuje Obr. 39. Došlo ke zmenšení střední hodnoty proudu a tím ke zvětšení hodnoty zvlnění proudu. Na průběhu napětí na zátěži se však tato změna neprojevila.



Obr. 39: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro zvyšování napětí při $U_i = 75 \text{ V}$

Pokud je hodnota indukovaného napětí příliš malá, může pro dané parametry dojít k provozu měniče s přerušovaným proudem. Obr. 40 znázorňuje průběh proudu a napětí při změně indukovaného napětí na hodnotu $U_i = 50 \text{ V}$. Došlo k přerušování proudu, což se na napětí na zátěži projevilo okamžiky rovnosti indukovanému napětí.



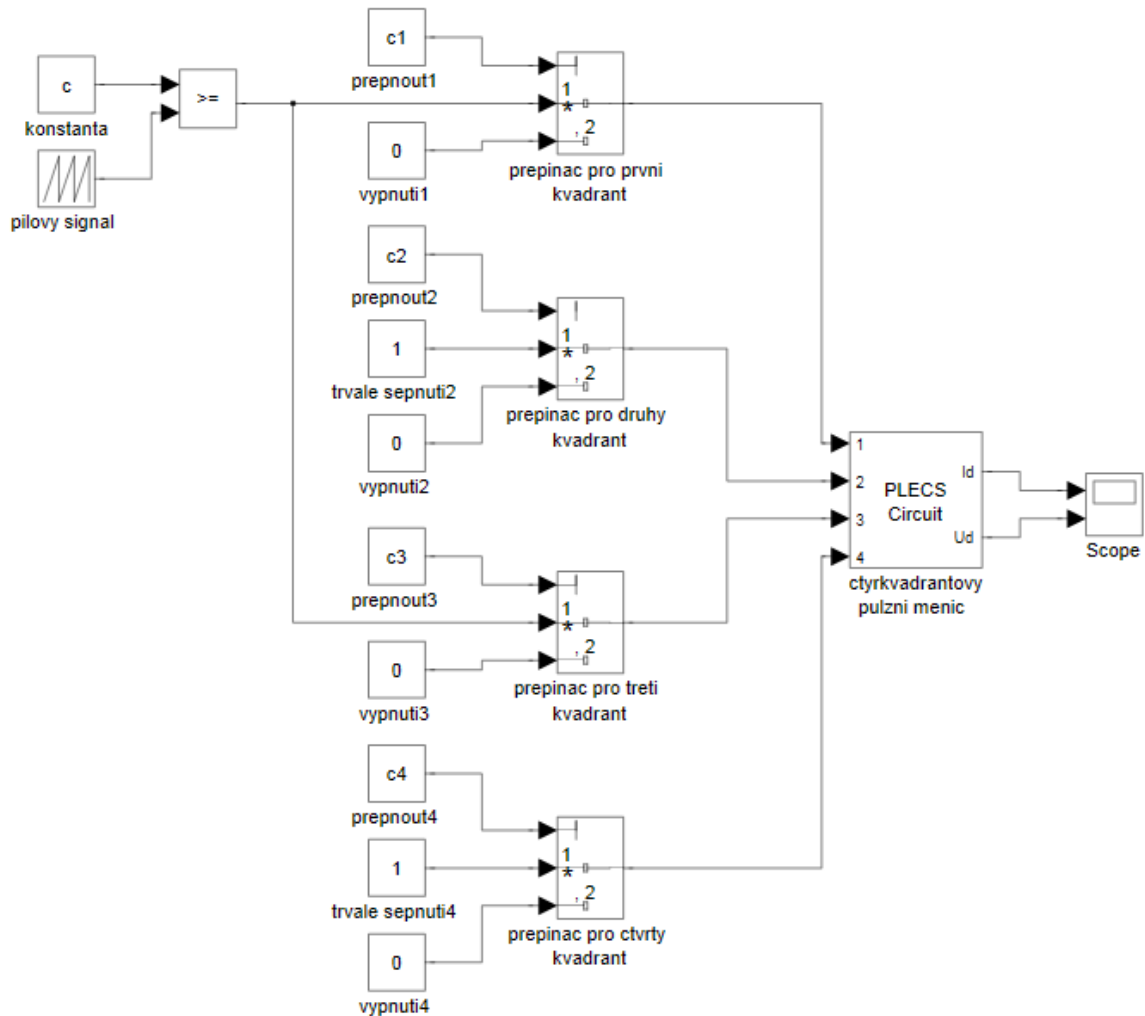
Obr. 40: Průběh proudu a napětí na zátěži pulzního měniče pro zvyšování napětí při $U_i = 50 \text{ V}$

3.3 Čtyřkvadrantový pulzní měnič

3.3.1 Změna parametrů

Řídící obvody tranzistorů byly vytvořeny v Simulinku. Přepínání typů řídicích signálů jednotlivých tranzistorů pro dané kvadranty bylo realizováno pomocí bloku Multiport Switch. Ten je ovládán pomocí uživatelské aplikace prostřednictvím proměnných c_1 , c_2 , c_3 a c_4 .

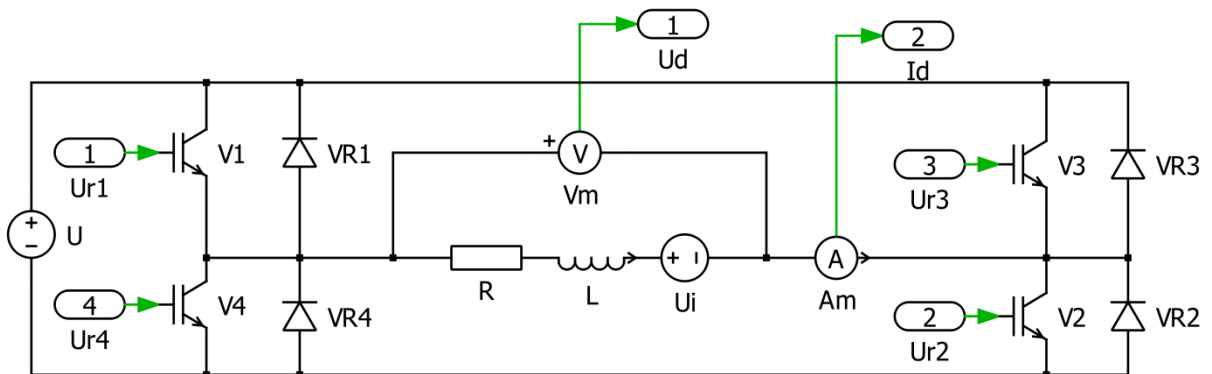
Schéma řízení čtyřkvadrantového měniče pomocí přepínačů lze vidět na *Obr. 41*. V dalším textu jsou pak pro každý kvadrant ukázána schémata s řízením pouze těch tranzistorů, které se podílejí na funkci daného kvadrantu.



Obr. 41: Schéma řízení čtyřkvadrantového pulzního měniče realizované pomocí přepínačů

Trvalé sepnutí tranzistoru bylo realizováno pouze pomocí bloku Constant, přičemž hodnota této konstanty musí být 1. Pulzní spínání bylo zařízeno porovnáním pilového signálu z bloku Repeated Sequence s hodnotou konstanty opět z bloku Constant. Princip porovnání a vzniku řídicího signálu je popsán v oddílu 3.1.1 (str. 24). Rozkliknutím bloku pilového signálu se objeví okno Source Block Parameters, ve kterém lze změnou hodnoty periody v kolonce Time Values měnit frekvenci pily a tím tedy spínací frekvenci tranzistoru. Dvojklikem na blok Constant se opět zobrazí okno Source Block Parameters, tentokrát v něm lze změnit hodnotu konstanty a tím i hodnotu poměrné doby sepnutí. Pilový signál nabývá hodnot 0 až 1, hodnotu konstanty je nutno nastavit stejnou jako hodnotu požadované poměrné doby sepnutí (pro $z = 0,25$ je nutno nastavit $c = 0,25$ apod.).

Samotné výkonové obvody měničů byly simulovány v PLECSu. Základní stavební jednotkou je blok PLECS Circuit, jehož rozkliknutím se zobrazí okno Circuit, ve kterém je sestavený obvod měniče. Tento obvod je pro všechny kvadranty stejný a lze jej vidět na *Obr. 42*. V obvodu měniče lze též měnit různé parametry, jako je odpor, indukované napětí, napájecí napětí či indukčnost. Změna těchto parametrů se provádí tak, že se dvojklikem na požadovanou součástku zobrazí okno Block Parameters. V tomto okně je kolonka pro nastavení hodnoty parametru dané součástky, např. u indukčnosti je nazvána Inductance, u odporu Resistance a u napěťových zdrojů Voltage.

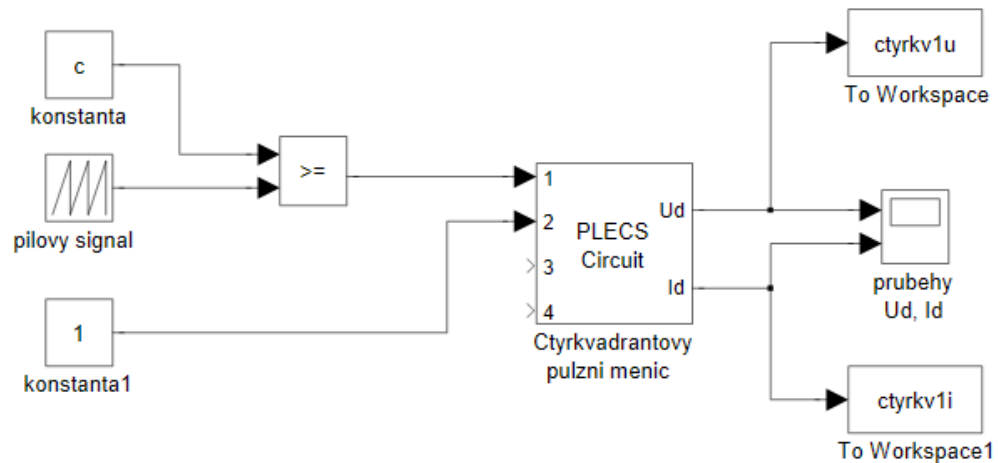


Obr. 42: Schéma obvodu čtyřkvadrantového pulzního měniče v prostředí PLECS

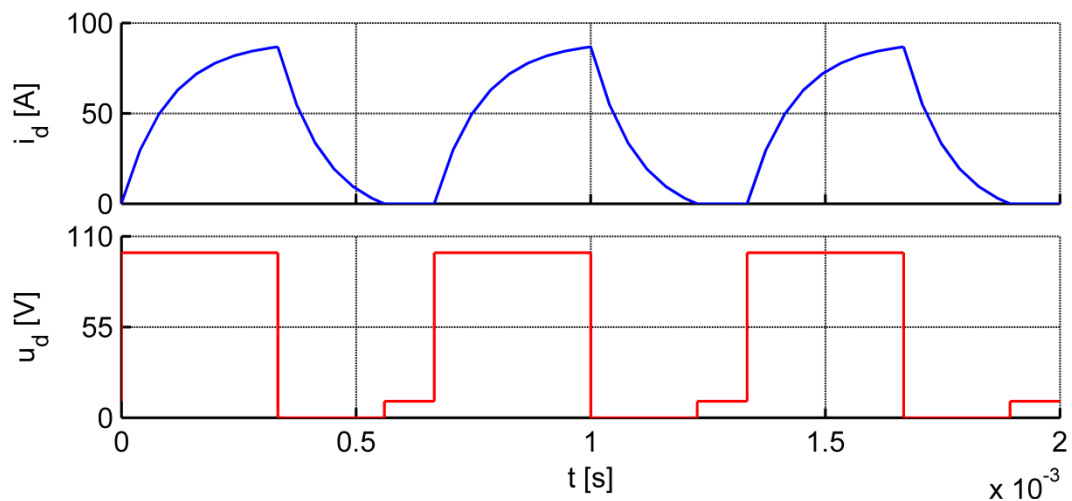
3.3.2 První kvadrant

Aby čtyřkvadrantový měnič pracoval v režimu prvního kvadrantu, je nutné spínat tranzistor V1 pulzně a současně udržovat tranzistor V2 trvale sepnutý. Realizace řídicího obvodu v režimu prvního kvadrantu v prostředí Simulink je vidět na *Obr. 43*. Změna parametrů řídicího obvodu (spínací frekvence, poměrná doba sepnutí) a parametrů obvodu měniče (indukčnost, odpor, indukované napětí) je popsána výše.

Prvnímu kvadrantu odpovídá kladný smysl napětí i proudu. Nejprve byly nastaveny parametry čtyřkvadrantového pulzního měniče následovně: $f = 1500 \text{ Hz}$, $U_i = 10 \text{ V}$, $L = 0,1 \text{ mH}$, $R = 1 \Omega$. Nastavením poměrné doby sepnutí $z = 0,5$ při daných parametrech vznikl přerušovaný proud, viz graf na *Obr. 44*. Na průběhu napětí se projeví přerušovaný proud, v místě nulového proudu skokově stoupne hodnota napětí na zátěži na hodnotu indukovaného napětí.



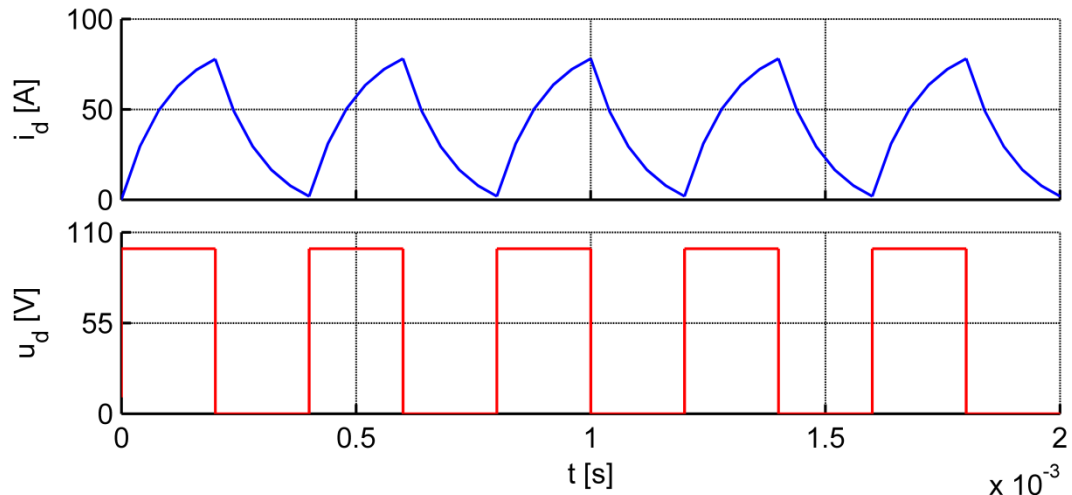
Obr. 43: Řídicí obvod a vizualizace výstupů simulace pro první kvadrant čtyřkvadrantového pulzního měniče v prostředí Simulink



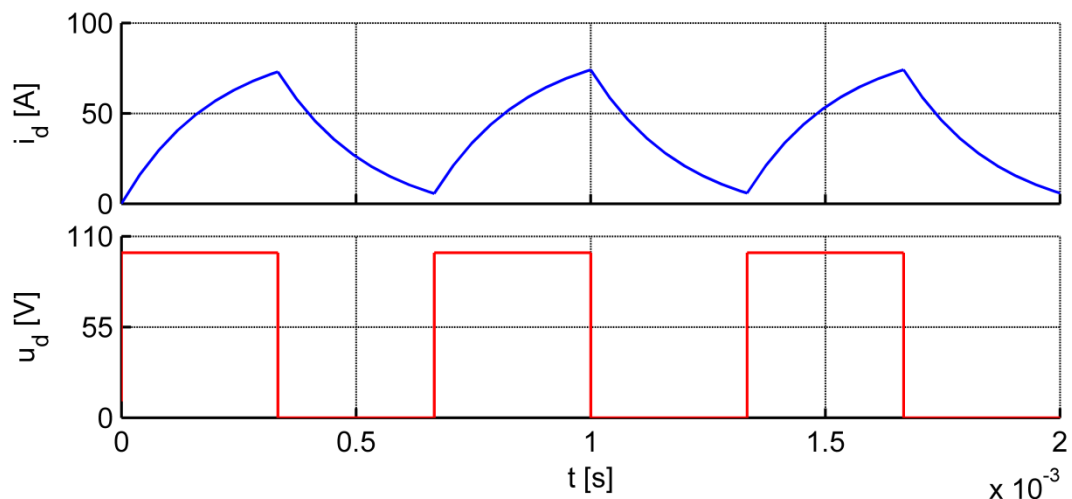
Obr. 44: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v režimu prvního kvadrantu při $z = 0,5$, $f = 1500$ Hz, $L = 0,1$ mH

Obr. 45 ukazuje, jak se průběh proudu změní, když zůstanou zachovány stejné parametry jako u obrázku předchozího, ale hodnota frekvence se zvětší na $f = 2500$ Hz. Z obrázku je zřejmé, že zhuštěním pulzů došlo ke zmenšení zvlnění proudu natolik, že přerušovaný proud zanikl. To se projevilo i na průběhu napětí, byly tím odstraněny intervaly, kdy je napětí na zátěži rovno napětí indukovanému.

Na Obr. 46 je vidět, že přerušovaný proud lze odstranit též jiným způsobem. Zmenšení zvlnění lze při výše uvedených parametrech dosáhnout též zvětšením hodnoty indukčnosti na hodnotu $L = 0,2$ mH. Hodnota frekvence zůstane $f = 1500$ Hz, perioda spínání tedy zůstane zachována.



Obr. 45: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v režimu prvního kvadrantu při $z = 0,5$, $f = 2500$ Hz, $L = 0,1$ mH

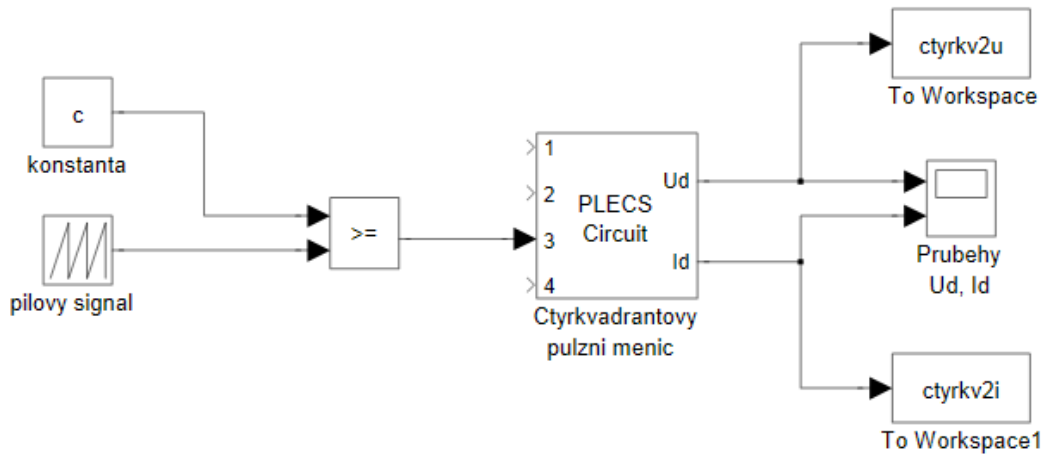


Obr. 46: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v režimu prvního kvadrantu při $z = 0,5$, $f = 1500$ Hz, $L = 0,2$ mH

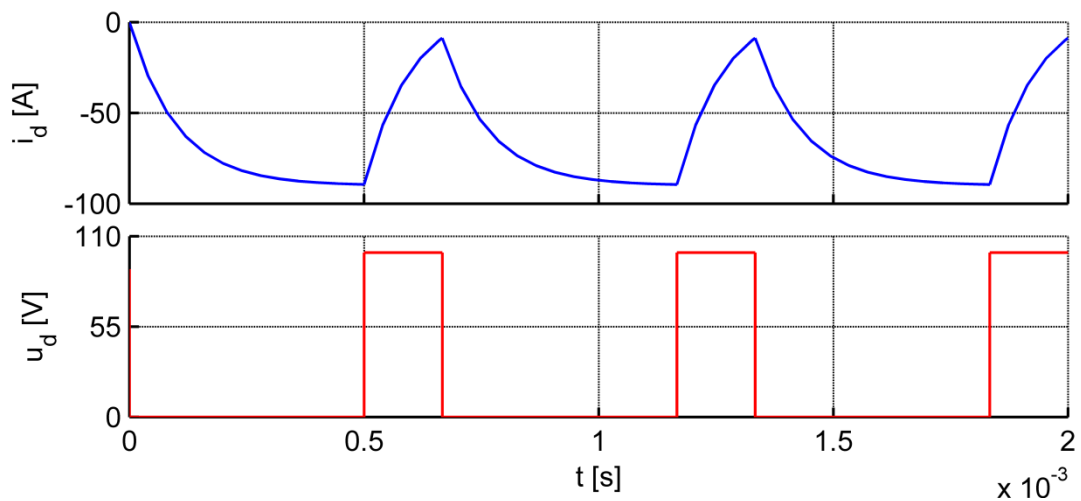
3.3.3 Druhý kvadrant

V režimu druhého kvadrantu dochází k pulznímu spínání pouze tranzistoru V3. Realizace řídicího obvodu v režimu druhého kvadrantu je vidět na *Obr. 47*. Změna parametrů řídicího obvodu (spínací frekvence, poměrná doba sepnutí) je popsána výše, viz oddíl 3.3.1 (str. 37), změna parametrů obvodu měniče taktéž.

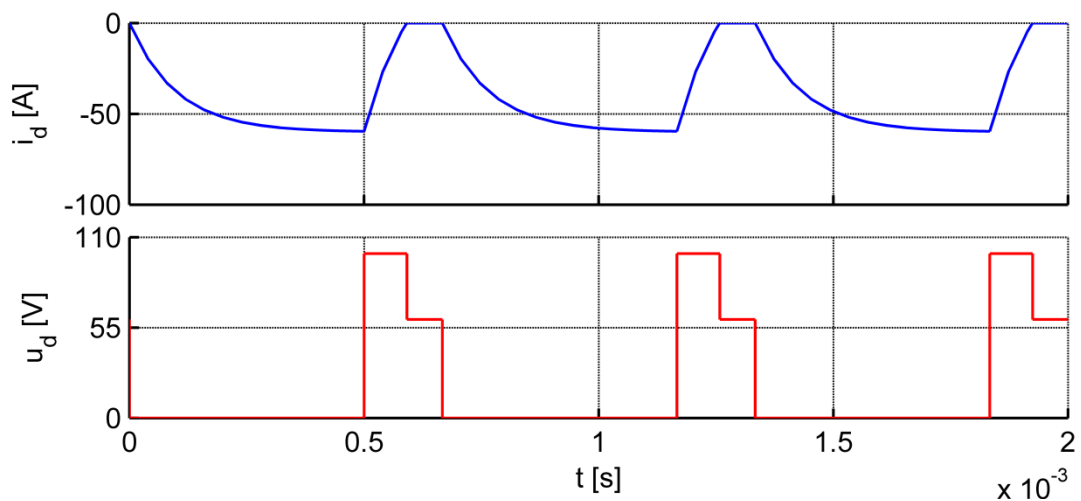
Pro druhý kvadrant je charakteristické kladné napětí a záporný proud. *Obr. 48* znázorňuje výsledek simulace provedené při nastavení parametrů: $z = 0,75$, $f = 1500$ Hz, $U_i = 90$ V, $L = 0,1$ mH, $R = 1$ Ω . Poté byla změněna hodnota indukovaného napětí na $U_i = 60$ V, což způsobilo přerušovaný proud, viz *Obr. 49*. Tuto změnu zaznamenal i průběh napětí na zátěži, v intervalech přerušování proudu je jeho hodnota rovna indukovanému napětí.



Obr. 47: Řídicí obvod a vizualizace výstupů simulace pro druhý kvadrant čtyřkvadrantového pulzního měniče v prostředí Simulink

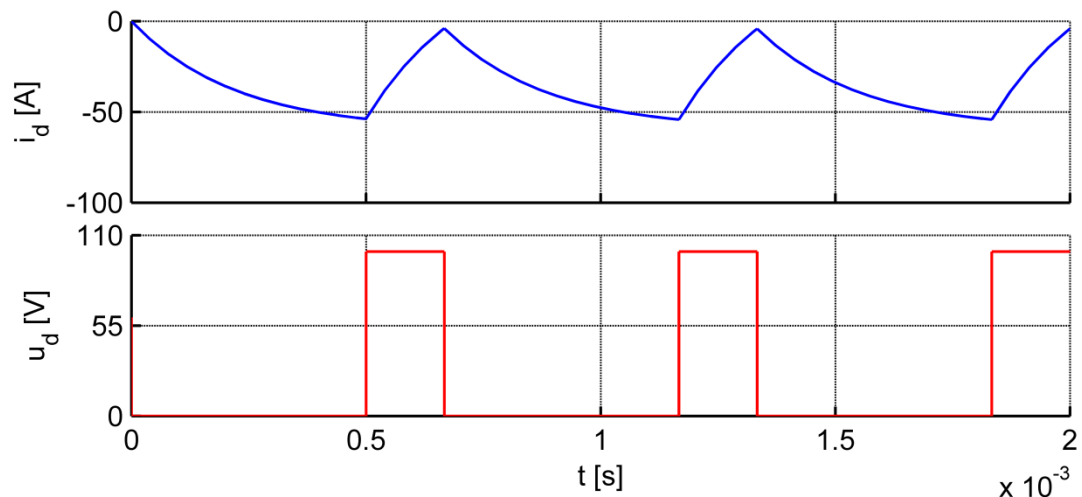


Obr. 48: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v režimu druhého kvadrantu při $U_i = 90 \text{ V}$, $L = 0,1 \text{ mH}$



Obr. 49: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v režimu druhého kvadrantu při $U_i = 60 \text{ V}$, $L = 0,1 \text{ mH}$

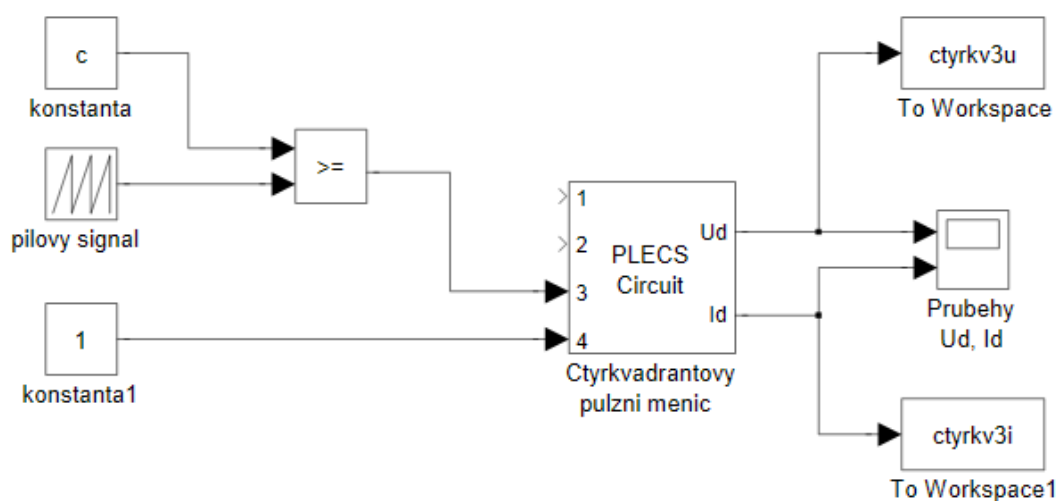
Obr. 50 ukazuje změnu proudových a napěťových poměrů při $U_i = 60 \text{ V}$ a současné změně indukčnosti na hodnotu $L = 0,22 \text{ mH}$. Jak lze vidět, tato změna vyvolala zánik přerušovaného proudu a současně výrazné zmenšení hodnoty jeho zvlnění. V případě napětí na zátěži zanikly intervaly rovnosti indukovanému napětí. Jelikož nebyla změněna hodnota frekvence či poměrné doby sepnutí, napětí na zátěži získalo opět stejný průběh jako před změnami



Obr. 50: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v režimu druhého kvadrantu při $U_i = 60 \text{ V}$, $L = 0,22 \text{ mH}$

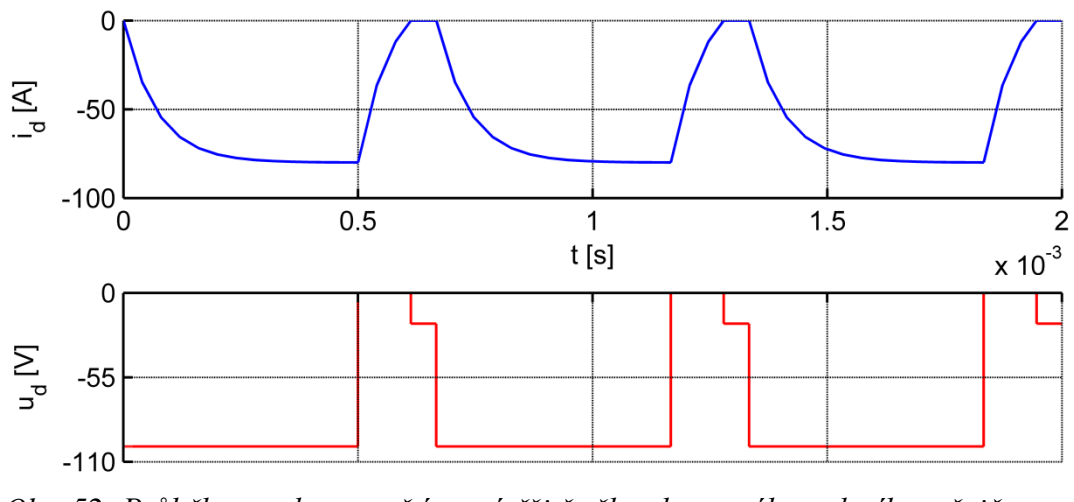
3.3.4 Třetí kvadrant

Pro dosažení chodu čtyřkvadrantového měniče v režimu třetího kvadrantu je nutné spínat tranzistor V3 pulzně a tranzistor V4 udržovat trvale sepnutý. Realizace řídicího obvodu v režimu prvního kvadrantu je vidět na Obr. 51.



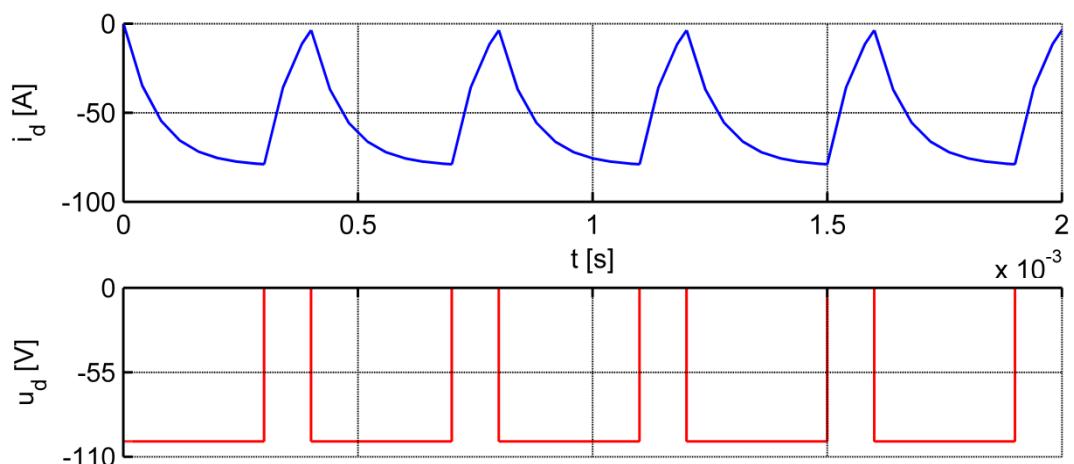
Obr. 51: Řídicí obvod a vizualizace výstupů simulace pro třetí kvadrant čtyřkvadrantového pulzního měniče v prostředí Simulink

Třetí kvadrant se vyznačuje záporným smyslem napětí i proudu. Obr. 52 znázorňuje výsledek simulace provedené s nastavenými parametry: $z = 0,75$, $f = 1500$ Hz, $U_i = 20$ V, $L = 0,07$ mH, $R = 1$ Ω . Vlivem příliš malé indukčnosti nastal provoz měniče s přerušovaným proudem, což se projevilo i na průběhu napětí na zátěži. V okamžicích přerušování proudu je napětí na zátěži rovno hodnotě indukovaného napětí.



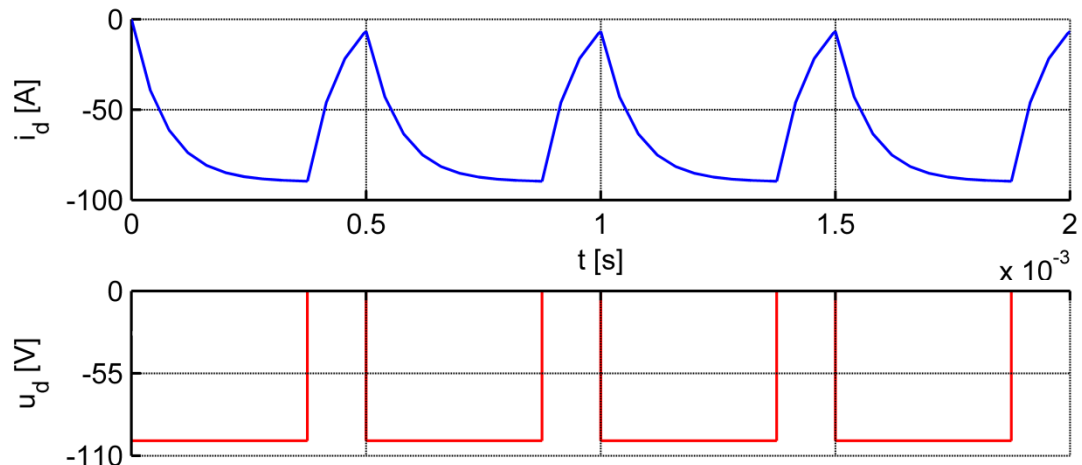
Obr. 52: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v režimu třetího kvadrantu při $U_i = 20$ V, $f = 1500$ Hz

Obr. 53 ukazuje, jak lze odstranit vzniklý přerušovaný proud. Lze tak učinit např. zvětšením frekvence na hodnotu $f = 2500$ Hz. Tím dojde ke zhuštění pulzů, zkrácení spínací periody a zmenšení zvlnění proudu. Odstraněním přerušovaného proudu dojde k zániku intervalů, kdy je napětí na zátěži rovno indukovanému napětí.



Obr. 53: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v režimu třetího kvadrantu při $U_i = 20$ V, $f = 2500$ Hz

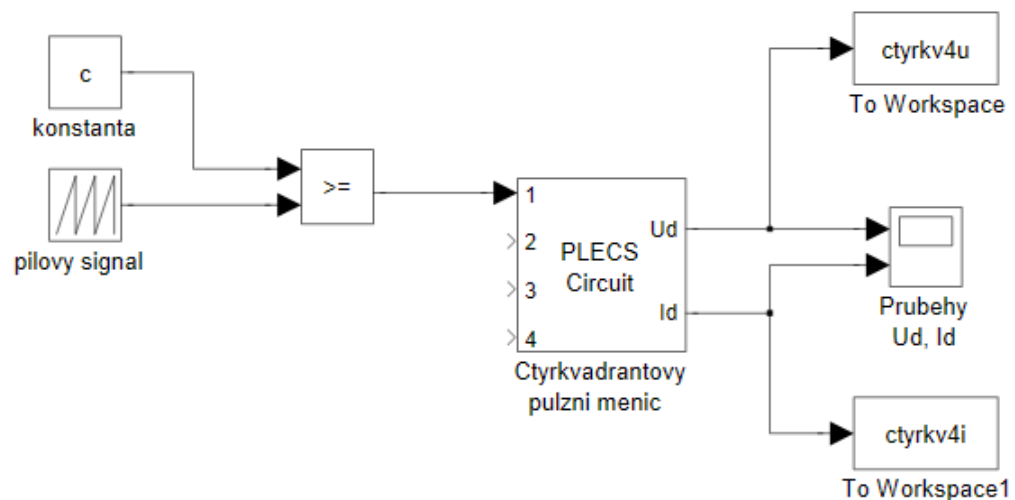
Další možností je změnit více parametrů. *Obr. 54* znázorňuje změnu oproti prvnímu průběhu při zvětšení frekvence na $f = 2000$ Hz a současně zmenšení hodnoty indukovaného napětí na $U_i = 10$ V. Na průběhu napětí se projevila změna frekvence změnou počtu pulzů.



Obr. 54: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v režimu třetího kvadrantu při $U_i = 10$ V, $f = 2000$ Hz

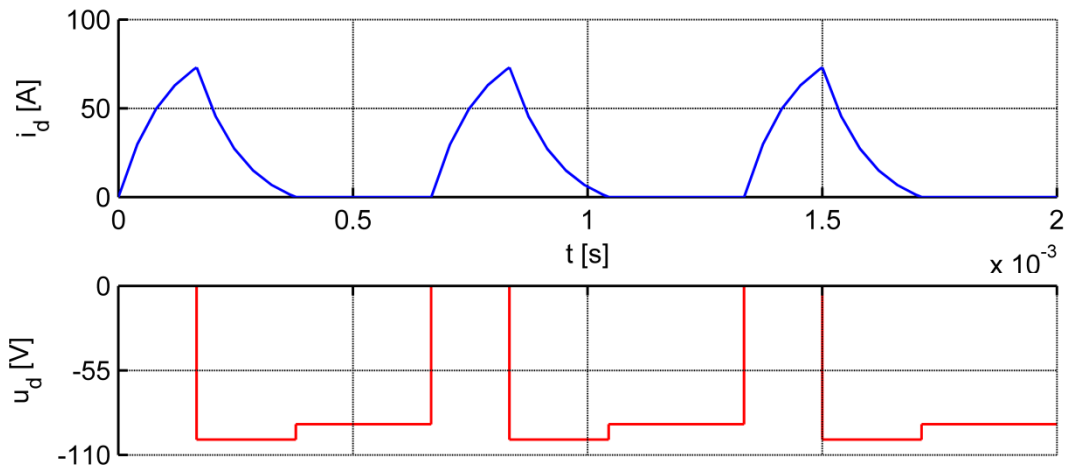
3.3.5 Čtvrtý kvadrant

Aby čtyřkvadrantový měnič pracoval v režimu čtvrtého kvadrantu, je nutné pouze pulzně spínat tranzistor V1. Realizace řídicího obvodu v režimu čtvrtého kvadrantu je vidět na *Obr. 55*. Změna parametrů řídicího obvodu (spínací frekvence, poměrná doba sepnutí) a taktéž změna parametrů v obvodu měniče je popsána výše, viz oddíl 3.3.1 (str. 37).



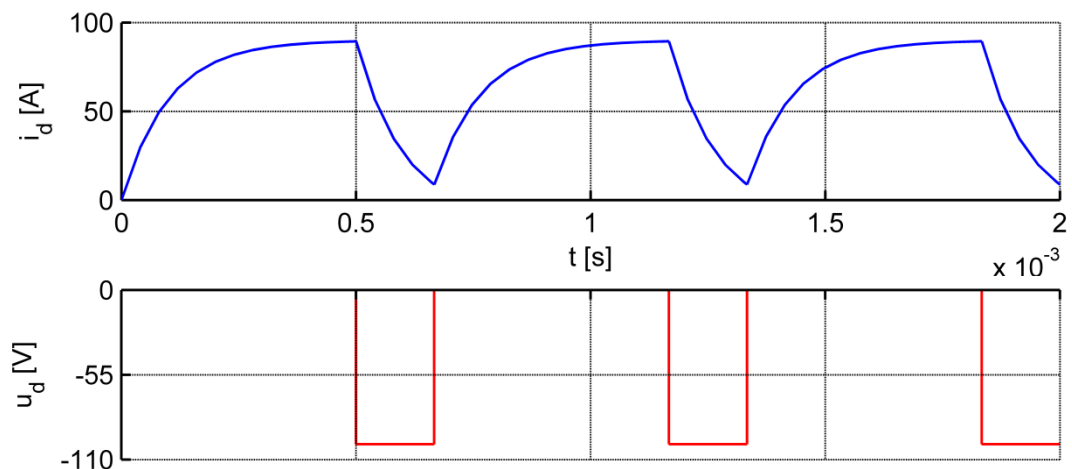
Obr. 55: Řídicí obvod a vizualizace výstupů simulace pro čtvrtý kvadrant čtyřkvadrantového pulzního měniče v prostředí Simulink

Čtvrtý kvadrant se vyznačuje kladnou orientací proudu a zápornou orientací napětí. První graf na *Obr. 56* znázorňuje výstup simulace provedené při nastavených parametrech: $z = 0,25$, $f = 1500$ Hz, $U_i = 10$ V, $L = 0,1$ mH, $R = 1$ Ω . Hodnota poměrné doby sepnutí je tak malá, tedy tranzistor je sepnut tak krátce, že proud po jeho vypnutí velice brzy klesne na nulovou hodnotu a tím dojde k jeho přerušení. Na průběhu napětí je názorně vidět interval přerušení proudu, kdy je napětí na zátěži rovno napětí indukovanému.



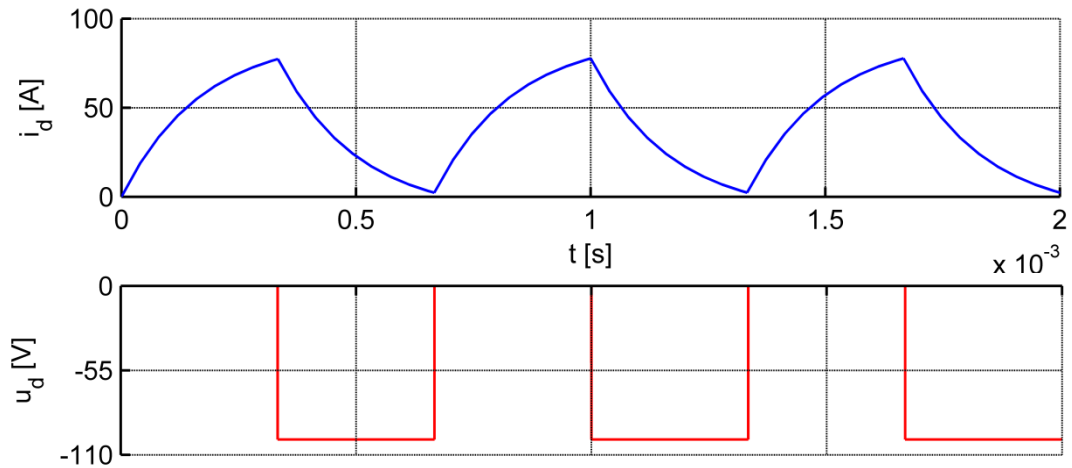
Obr. 56: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v režimu čtvrtého kvadrantu při $z = 0,25$, $L = 0,1$ mH

Jak ukazuje *Obr. 57*, zvětšením hodnoty poměrné doby sepnutí na $z = 0,75$ se prodlouží interval, kdy je proud veden tranzistorem a přerušovaný proud je odstraněn. Změna poměrné doby sepnutí je patrná též na průběhu napětí na zátěži, perioda spínání však zůstává nezměněna.



Obr. 57: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v režimu čtvrtého kvadrantu při $z = 0,75$, $L = 0,1$ mH

Obr. 58 znázorňuje průběh proudu, je-li hodnota poměrné doby sepnutí nastavena na $z = 0,5$ a současně je změněna i hodnota indukčnosti na $L = 0,17$ mH. I v tomto případě přerušovaný proud zaniká, spínací perioda opět zůstává konstantní.



Obr. 58: Průběh proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulzního měniče v režimu čtvrtého kvadrantu při $z = 0,5$, $L = 0,17$ mH

3.4 Uživatelská aplikace

Při výše uvedených popisech byly uvažovány manuální změny přímo v simulačních modelech. V rámci této bakalářské práce však byla vytvořena též uživatelská aplikace, pomocí které lze parametry měnit bez otevírání simulačních modelů a rozklikávání jednotlivých bloků.

Pomocí spouštěcího skriptu (viz Příloha A) se zavolá funkce vytvářející uživatelskou aplikaci (viz Příloha B). Objeví se okno, které lze vidět na Obr. 59. V tomto okně lze prostřednictvím popup menu přepínat mezi jednotlivými typy měničů, v případě čtyřkvadrantového měniče lze vybrat kvadrant a nastavení poměrné doby sepnutí probíhá též pomocí popup menu. Dále lze v editačních polích měnit hodnoty napětí zdroje, spínací frekvence, délku simulace a parametrů zátěže (odporu, indukčnosti, indukovaného napětí). Kliknutím na tlačítko Start se otevře vybraný model, spustí se simulace a otevře okno Scope zobrazující sledované průběhy proudu a napětí. Kliknutím na tlačítko Konec se aplikace ukončí a okno se zavře.

Obr. 59: Okno pro zadávání parametrů prostřednictvím uživatelské aplikace

3.5 Zvlnění proudu

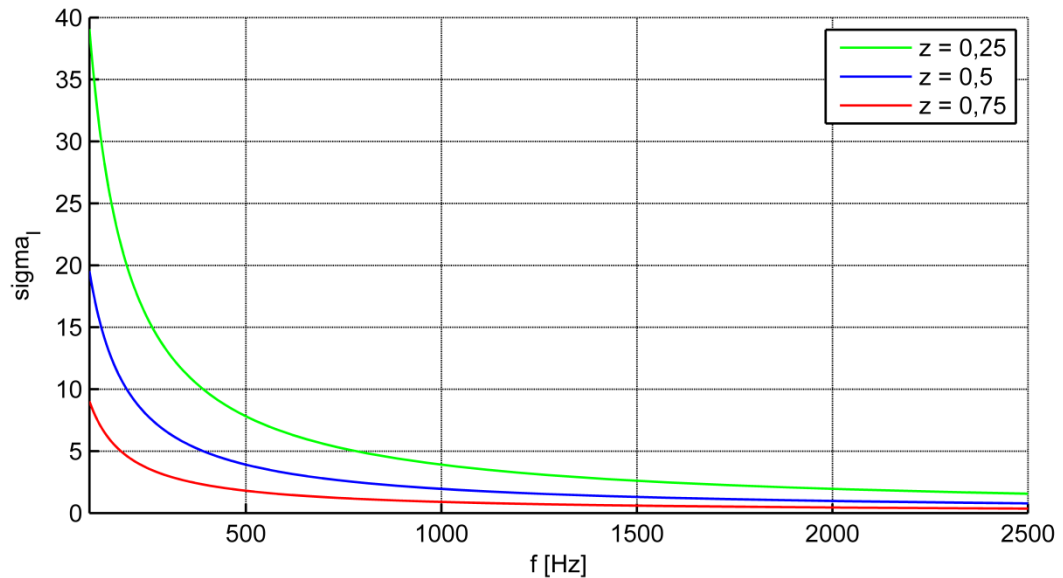
Tato kapitola bude věnována závislosti zvlnění proudu na spínací frekvenci a hodnotě indukčnosti. Zvlnění proudu lze určit podle vztahu [1]:

$$\sigma_I = \frac{i_{dMAX} - i_{dMIN}}{i_{dMAX} + i_{dMIN}} = \frac{\Delta i_d}{2I_d} \quad (1.8)$$

Jak vyplývá ze vztahů v první kapitole, je střední hodnota proudu I_d závislá pouze na hodnotě napětí zdroje a poměrné době sepnutí. Je-li tedy sledována závislost na spínací frekvenci či indukčnosti, střední hodnotu proudu protékajícího zátěží tyto dva parametry neovlivní. Zvlnění proudu je tím pádem přímo úměrné hodnotě Δi_d . Po úpravách lze získat vztah pro Δi_d [1]:

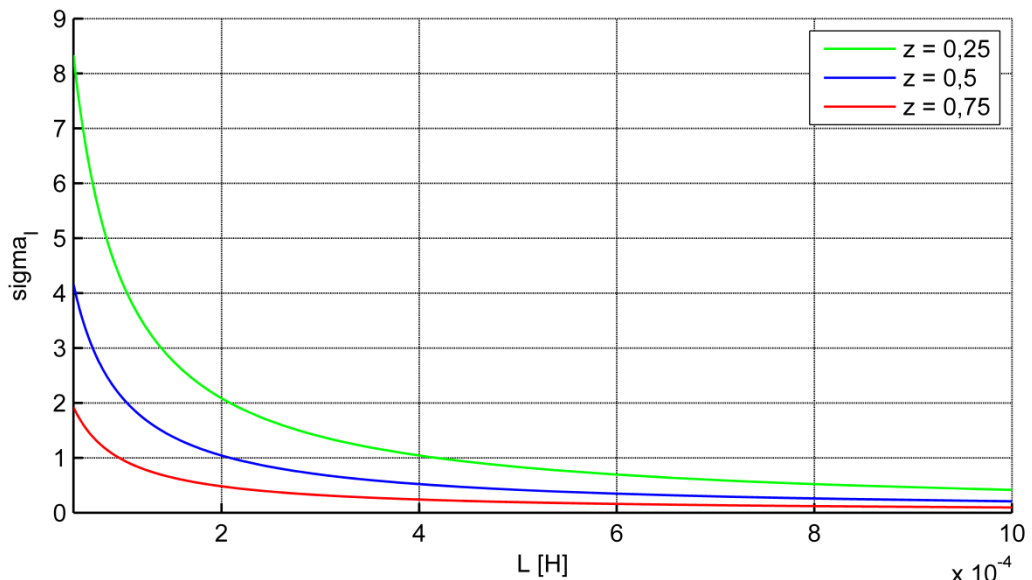
$$\Delta i_d = \frac{U \cdot z}{f \cdot L} \cdot (1 - z) \quad (1.9)$$

S pomocí těchto vzorců lze sestavit následující závislosti zvlnění proudu. Obr. 60 znázorňuje graf závislosti zvlnění proudu na spínací frekvenci pro různé hodnoty poměrné doby sepnutí. Je zřejmé, že s rostoucí frekvencí velikost zvlnění proudu limitně blíží nule. Nejnižše položená je křivka zvlnění při poměrné době sepnutí $z = 0,75$, při $z = 0,25$ je naopak položená nejvýše.



Obr. 60: Graf závislosti zvlnění proudu na spínací frekvenci pro různé hodnoty poměrné doby sepnutí

Graf závislosti zvlnění proudu na indukčnosti pro různé hodnoty poměrné doby sepnutí je na Obr. 61. Lze vidět, že zvlnění proudu s rostoucí indukčností klesá a opět se limitně blíží nule. V praxi se proto při minimalizaci hodnoty zvlnění volí spínací frekvence co největší a podle vztahu 1.9 se následně určí příslušná velikost indukčnosti.



Obr. 61: Graf závislosti zvlnění proudu na indukčnosti zátěže pro různé hodnoty poměrné doby sepnutí

4 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem simulačních modelů pulzních měničů. Tyto modely byly provázány s pomocí programového vybavení s uživatelskou aplikací tak, aby mohly sloužit jako pomůcka ve výuce. Podařilo se vytvořit uživatelské rozhraní, pomocí kterého je možné prostřednictvím popup menu a editačních polí vybírat jednotlivé typy pulzních měničů a měnit nastavené parametry simulací.

Byla popsána schémata a vlastnosti jednotlivých typů pulzních měničů. Pomocí těchto poznatků byly s využitím programového vybavení Matlabu, Simulinku a PLECSu vytvořeny jejich simulační modely.

Na těchto modelech pak byl prezentován vliv změny parametrů na průběhy proudu a napětí na zátěži. Sledovanými parametry byly spínací frekvence, poměrná doba sepnutí a parametry zátěže (odpor, indukčnost, indukované napětí). Dále byl sledován vliv změny parametrů na střední hodnotu a zvlnění proudu. Byly potvrzeny některé zákonitosti, např. že na střední hodnotu proudu má vliv pouze změna odporu, indukovaného napětí nebo poměrné doby sepnutí. Jelikož je zvlnění proudu závislé na střední hodnotě proudu, mají na jeho velikost vliv kromě změny indukčnosti, spínací frekvence a poměrné doby sepnutí též změna odporu a indukovaného napětí.

Dále bylo vytvořeno uživatelské rozhraní, pomocí kterého je možné prostřednictvím popup menu a editačních polí vybírat jednotlivé typy pulzních měničů a měnit parametry simulačních modelů a vlastních obvodů s pulzními měniči.

Všechny stanovené cíle byly splněny.

5 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika. Sv. 3, Měniče s vlastní komutací a bez komutace. Část 1, Pulsní měniče. 3., rozš. vyd.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2012. 118 s. ISBN 978-80-261-0143-7.
- [2] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 180 s. ISBN 80-7043-422-8.
- [3] VONDRÁŠEK, František. *Přednáška č. 4: Stejnoseměrné spínače a pulsní měniče.* FEL ZČU v Plzni.
- [4] ZEMAN, Karel. *Elektrické pohony: Výtah z přednášek.* FEL ZČU v Plzni, 2014.
- [5] JAVŮREK, Jiří. *Regulace moderních elektrických pohonů.* 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2003. 261 s. ISBN 80-247-0507-9.
- [6] DUŠEK, František a HONC, Daniel. *Matlab a Simulink: Úvod do používání.* 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2005. 172 s. ISBN 80-7194-776-8.
- [7] ZAPLATÍLEK, Karel a DOŇAR, Bohuslav. *MATLAB pro začátečníky.* 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 151 s. ISBN 80-7300-175-6
- [8] PLECS [online].[cit. 2014-05-31]. Dostupné na www: <<http://www.plexim.com/>>

Přílohy

Příloha A – Spouštěcí skript

```
close all;
clear all;
global U; %nastavení všech proměnných jako globální
global f;
global t;
global R;
global L;
global Ui;
global Uii;
global c;
global c1;
global c2;
global c3;
global c4;
nastaveni; %zavolání funkce nastaveni
```

Příloha B – Skript pro vytvoření uživatelské aplikace prostřednictvím funkce *nastaveni*

```
function nastaveni(start)
global U, global f, global z, global t, global R, global L, global Ui, global Uii, global c,
global c1, global c2, global c3, global c4
if nargin==0
    h=figure('Color',[0.1 0.9 1],'Position',[200 100 1000 600],'Name','Simulační model
    pulzního měniče','NumberTitle','off','MenuBar','none'); %vytvoření okna
    h1=uicontrol('Style','Text','String','Pulzní měnič:','Position',[60 500 200 30]);
    %vytvoření pole s nadpisem
    h2=uicontrol('Style','Popup','String','Snižovací|Zvyšovací|Čtyřkvadrantový','Position',
    [100 452 150 20],'Tag','menic','Callback','nastaveni menic'); %vytvoření popup menu
    h3=uicontrol('Style','Text','String','Efektivní hodnota napětí zdroje:','Position',
    [405 500 400 30]);
    h4=uicontrol('Style','Text','String','U','Position',[445 450 20 22]); %vytvoření pole s
    názvem veličiny
    h5=uicontrol('Style','Edit','String',100,'Position',[475 450 60 22],'Tag','U'); %vytvoření
    editačního pole
    h6=uicontrol('Style','Text','String','[V]','Position',[545 450 50 23]); %vytvoření pole s
    jednotkou
    h7=uicontrol('Style','Text','String','Frekvence pily:','Position',[405 325 200 30]);
    h8=uicontrol('Style','Text','String','f','Position',[445 275 20 22]);
    h9=uicontrol('Style','Edit','String',1500,'Position',[475 275 60 22],'Tag','f');
    h10=uicontrol('Style','Text','String','[Hz]','Position',[545 275 50 23]);
    h11=uicontrol('Style','Text','String','Poměrná doba sepnutí:','Position',[60 150 400 30]);
    h12=uicontrol('Style','Popup','String','0.25|0.5|0.75','Position',[100 100 65 22],'Tag',
    'z','Callback','nastaveni z');
    h13=uicontrol('Style','Text','String','Kvadrant:','Position',[60 325 200 30]);
    h14=uicontrol('Style','Popup','String','1|2|3|4','Position',[100 277 65 22],'Tag',
    'kvadrant','Callback','nastaveni kvadrant','Enable','off');
    h15=uicontrol('Style','Text','String','Parametry zátěže:','Position',[750 500 200 30]);
    h16=uicontrol('Style','Text','String','R','Position',[790 450 20 22]);
    h17=uicontrol('Style','Edit','String',1,'Position',[820 450 60 22],'Tag','R');
    h18=uicontrol('Style','Text','String','[Ohm]','Position',[890 450 50 23]);
    h19=uicontrol('Style','Text','String','L','Position',[790 400 20 22]);
    h20=uicontrol('Style','Edit','String',0.00016,'Position',[820 400 60 22],'Tag','L');
    h21=uicontrol('Style','Text','String','[H]','Position',[890 400 50 23]);
    h22=uicontrol('Style','Text','String','Ui','Position',[790 350 20 22]);
    h23=uicontrol('Style','Edit','String',10,'Position',[820 350 60 22],'Tag','Uii');
    h24=uicontrol('Style','Text','String','[V]','Position',[890 350 50 23]);
    h25=uicontrol('Style','Text','String','Doba simulace:','Position',[405 150 200 30]);
    h26=uicontrol('Style','Text','String','t','Position',[445 100 20 20]);
    h27=uicontrol('Style','Edit','String',0.002,'Position',[475 100 60 22],'Tag','cas');
    h28=uicontrol('Style','Text','String','[s]','Position',[545 100 50 22]);
    h29=uicontrol('Style','Push','String','Start','Position',[800 200 100 20],'CallBack',
    'nastaveni start'); %vytvoření push tlačítka
    h30=uicontrol('Style','Push','String','Konec','Position',[800 100 100 20],'CallBack',
    'nastaveni konec');
    set([h1,h3,h7,h11,h13,h15,h25],'BackgroundColor',[0.1 0.9 1],'ForegroundColor','black',
    'FontSize',13,'HorizontalAlignment','left'); %formát pole s nadpisem
    set([h4,h8,h16,h19,h22,h26],'BackgroundColor',[0.1 0.9 1],'ForegroundColor','black',
    'FontSize',13,'FontWeight','bold','HorizontalAlignment','left'); %formát pole s
    názvem veličiny
    set([h6,h10,h18,h21,h24,h28],'BackgroundColor',[0.1 0.9 1],'ForegroundColor','black',
    'FontSize',12,'HorizontalAlignment','left'); %formát pole s jednotkou
```

```

set([h5,h9,h17,h20,h23,h27],'BackgroundColor','white','ForegroundColor','black',
    'FontSize',11,'HorizontalAlignment','left'); %formát editačních polí
set([h2,h12,h14],'BackgroundColor','white','ForegroundColor','black','FontSize',12,
    'HorizontalAlignment','left'); %formát popup menu
set([h29,h30],'BackgroundColor',[0.1 0.9 1],'ForegroundColor','black','FontSize',13,
    'FontWeight','bold','HorizontalAlignment','left'); %formát push tlačítek
else
switch(start)
case('menic')
menic=get(findobj('Tag','menic'),'Value'); %uložení výběru měniče do proměnné
switch menic %nastavení zpřístupnění výběru kvadrantu
case(1)
set(findobj('Tag','kvadrant'),'Enable','off'); %výběr nepřístupný
case(2)
set(findobj('Tag','kvadrant'),'Enable','off'); %výběr nepřístupný
case(3)
set(findobj('Tag','kvadrant'),'Enable','on'); %výběr přístupný
end
case('start')
menic=get(findobj('Tag','menic'),'Value'); %uložení výběru měniče do proměnné
U=str2num(get(findobj('Tag','U'),'String')); %převod zadané hodnoty U na číslo,
    uložení do proměnné
f=str2num(get(findobj('Tag','f'),'String')); %převod zadané hodnoty f na číslo,
    uložení do proměnné
kvadrant=get(findobj('Tag','kvadrant'),'Value'); %uložení výběru kvadrantu do
    proměnné
R=str2num(get(findobj('Tag','R'),'String')); %převod zadané hodnoty R na číslo,
    uložení do proměnné
L=str2num(get(findobj('Tag','L'),'String')); %převod zadané hodnoty L na číslo,
    uložení do proměnné
Uii=str2num(get(findobj('Tag','Uii'),'String')); %převod zadané hodnoty Ui na
    číslo, uložení do proměnné
t=str2num(get(findobj('Tag','cas'),'String')); %převod zadané hodnoty t na číslo,
    uložení do proměnné
z=get(findobj('Tag','z'),'Value'); %uložení zadané poměrné doby sepnutí do
    proměnné

if kvadrant==1 %nastavení hodnoty konstanty podle výběru kvadrantu
c1=1;c2=1;
c3=2;c4=2;
Ui=Uii;
elseif kvadrant==2
c3=1;
c1=2;c2=2;c4=2;
Ui=-Uii;
elseif kvadrant==3
c3=1;c4=1;
c1=2;c2=2;
Ui=-Uii;
else
c1=1;
c2=2;c3=2;c4=2;
Ui=Uii;
end

if z==1 %nastavení hodnoty konstanty podle výběru poměrné doby sepnutí
c=0.25;
elseif z==2
c=0.5;
else
c=0.75;
end

if U<=0||f<=0||R<0||L<0||Uii<0||t<0 %vyloučení záporných či nulových hodnot
p1=figure('Color',[1 0.1 0.1],'Position',[450 200 500 300],'Name','Hlášení o
chybě','NumberTitle','off','MenuBar','none'); %vytvoření okna
chybového hlášení
p2=uicontrol('BackgroundColor',[1 0.1 0.1],'ForegroundColor','black','Style',
'Text','String','Chybně zadané hodnoty parametrů
simulace.','Position',[55 120 400 50],'FontSize',14); %výpis chybového
hlášení
elseif U<=Ui
p3=figure('Color',[1 0.1 0.1],'Position',[450 200 500 300],'Name','Hlášení o
chybě','NumberTitle','off','MenuBar','none');
p4=uicontrol('BackgroundColor',[1 0.1 0.1],'ForegroundColor','black','Style',
'Text','String','Zadejte U>Ui.','Position',[55 120 400 50],'FontSize',
14);

```

```
elseif menic==1 %otevření a spuštění simulačního modelu podle výběru měniče
    open('snizovaci')
    sim('snizovaci','SrcWorkspace','current','StopTime','t')
elseif menic==2
    open('zvysovaci')
    sim('zvysovaci','SrcWorkspace','current','StopTime','t')
elseif menic==3
    open('ctyrkvadrantovy')
    sim('ctyrkvadrantovy','SrcWorkspace','current','StopTime','t')
end

bh=find_system(gcs,'FindAll','on','BlockType','Scope'); %automatické otevření okna
                                                    Scope

for x=1:length(bh)
    set_param(bh(x),'Open','off');
end
for x=1:length(bh) %automatické zaostření Autoscale
    set_param(bh(x),'Open','on');
    fh=gcf;
    AxesInScope=findall(fh,'type','axes');
    for y=1:length(AxesInScope)
        set(fh,'CurrentAxes',AxesInScope(y));
        xlim('auto');
        ylim('auto');
    end
end

case('konec')
    close all %zavřít vše
end
end
```