

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Regulace jednofázového napět'ového střídače

vedoucí práce: Ing. Vojtěch Blahník, Ph.D.

2012/2013

autor: Lukáš Makovec

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš MAKOVEC**
Osobní číslo: **E12B0229P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Regulace jednofázového napěťového střídače**
Zadávací 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. Sestavení simulačního modelu jednofázového napěťového střídače.
2. Návrh a analýza řízení jednofázového napěťového střídače.
3. Ověření vlastností navrženého algoritmu řízení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. **Vondrášek, F.: Výkonová elektronika, svazek III., Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň, 2003.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vojtěch Blahník, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.

děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem simulačních programů napětového střídače. V první řadě je popsána funkce jednofázového napětového střídače v čtyř-kvadrantovém pulzním zapojení, H-můstek. Dále jsou pak provedeny simulace v prostředí MATLAB *Simulink* při obdélníkovém řízení, šířkovém pulzním řízení a šířkovém pulzně modulovaném řízení. V poslední části bakalářské práce jsou zhodnoceny typy řízení.

Klíčová slova

Napětový střídač, čtyř-kvadrantový pulzní měnič, obdélníkové šířkové řízení, šířkové pulzní řízení, šířkové pulzně modulované řízení, MATLAB *Simulink*, IGBT,

Abstract

This bachelor thesis deals with simulation programs voltage inverter. In the first row describes the function of single-phase voltage inverter in a four-quadrant diagram pulse, H-bridge. The following are then simulated in MATLAB Simulink with a rectangular control, width control pulse and pulse width modulated control. In the last part of the thesis are evaluated types of proceedings.

Key words

Voltage inverter, four-quadrant diagram pulse, rectangular pulse width control, pulse width control, pulse width modulation, MATLAB *Simulink*, IGBT.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval 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

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Vojtěchovi Blahníkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Seznam symbolů a zkratk.....	9
Seznam obrázků	10
Úvod	11
1 MATLAB.....	12
1.1 Oblasti použití MATLABu	12
1.2 Vhodné použití MATLABu	12
1.3 Nevhodné použití MATLABu	13
2 Napěťové střídače	14
2.1 Bilance výkonů	14
2.2 Spínací prvky používané ve výkonových měničích.....	16
2.3 Popis činnosti napěťového střídače	17
3 Způsoby řízení DC/AC měničů	20
4 Simulace	22
4.1 Obdélníkové šířkové řízení při $\Psi = \pi$	22
4.2 Obdélníkové šířkové řízení při $\Psi < \pi$	26
4.3 Šířkové pulzní řízení	30
4.4 Šířkové pulzně modulované řízení	33
5 Závěr.....	37
6 Použitá literatura	38

Seznam symbolů a zkratk

AC	Alternating current	
DC	Direct current	
$MATLAB$	MATrix LABoratory	
U	napětí zdroje	[V]
U_d	střední hodnota stejnosměrného napětí	[V]
u_d	okamžitá hodnota napětí	[V]
I_d	střední hodnota stejnosměrného proudu	[A]
i_d	okamžitá hodnota proudu ve stejnosměrném obvodu	[A]
P	činný výkon	[W]
p	okamžitá hodnota činného výkonu	[W]
Z	impedance zátěže	[Ω]
R	odpor zátěže	[Ω]
L	indukčnost zátěže	[H]
τ	časová konstanta	[s]
$U_{Zm(n)}$	amplituda napětí n-té harmonické	[V]
$U_{Z(n)}$	efektivní hodnota napětí n-té harmonické	[V]
$B_{(n)}$	amplituda n-té harmonické	[-]
$i_{Z(n)}$	efektivní hodnota proudu n-té harmonické	[A]
Ψ	délka pulzu přivedený na polovodičový prvek	[s]
Ψ_S	skutečný interval otevření tranzistoru	[s]
Ψ_R	interval otevření zpětných diod	[s]
f	frekvence	[Hz]
$f_{T1,T2}$	spínací frekvence tranzistorů T1 a T2	[Hz]
$f_{T3,T4}$	spínací frekvence tranzistorů T3 a T4	[Hz]
f_{pila}	frekvence pilového signálu	[Hz]
f_{50}	požadovaný sinusový signál	[Hz]

Seznam obrázků

- Obr. 2.1 Schéma toku energie napětovým střídačem
- Obr. 2.2 Schéma zapojení DC/AC napětového střídače
- Obr. 2.3 Průběh spínacího pulzu
- Obr. 4.1 Schéma DC/AC napětového střídače v prostředí MATLAB *Simulink* při obdélníkovém řízení
- Obr. 4.2 Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB *Simulink* při $f = 500\text{Hz}$
- Obr. 4.3 Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB *Simulink* při $f = 2000\text{Hz}$
- Obr. 4.4 Schéma DC/AC napětového střídače v prostředí MATLAB *Simulink* při obdélníkovém řízení při $\Psi = 70\%$ z *periody*
- Obr. 4.5 Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB *Simulink* při $f = 500\text{Hz}$ a $\Psi = 70\%$ z *periody*
- Obr. 4.6 Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB *Simulink* při $f = 2000\text{Hz}$ a $\Psi = 70\%$ z *periody*
- Obr. 4.7 Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB *Simulink* při $f_{T1,T2} = 500\text{Hz}$, $f_{T3,T4} = 5000\text{Hz}$
- Obr. 4.8 Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB *Simulink* při $f_{T1,T2} = 500\text{Hz}$, $f_{T3,T4} = 20\,000\text{Hz}$
- Obr. 4.9 Schéma DC/AC měniče v prostředí MATLAB *Simulink* při šířkovém pulzně modulovaném řízení
- Obr. 4.10 Graf pilového a žádaného sinusového signálu. Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB *Simulinku* řízeného pulzně šířkovou modulací při $f_{pila} = 1000\text{Hz}$
- Obr. 4.11 Graf pilového a žádaného sinusového signálu. Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB *Simulinku* řízeného pulzně šířkovou modulací při $f_{pila} = 5000\text{Hz}$

Úvod

V této práci se budeme zabývat jednofázovým DC (Direct Current) / AC (Alternating Current) napětovým střídačem a návrhem řízení. Pro simulaci napětového střídače budeme využívat prostředí MATLAB Simulink.

Využití napětových střídačů v dnešní době je velice široké. Jedná se o zařízení přeměňující stejnosměrné napětí na napětí střídavé, které odebíráme na výstupu střídače. Konstrukce střídače může být jednofázová, třífázová nebo vícefázová.

Moderní oblastí používání napětových střídačů je v energetice, pro připojení solárních článků do elektrorozvodné sítě. Solární články jsou schopny dodávat pouze stejnosměrnou energii a proto je nelze přímo připojit na elektrorozvodnou síť.

V další skupině využíváme měniče jako zdroje regulovaného napětí a frekvence pro napájení a řízení otáček elektrických pohonů v průmyslu a dopravě. Typické řízení trakčních vozidel vybavených asynchronními motory, které jsou napájeny ze stejnosměrné napájecí soustavy 3kV, v Česku to jsou například jednotky Pendolino, elektrické jednotky 471 nebo tramvaje ForCity.

V serverových operačních místnostech, v nemocnicích, na letištích a elektrárnách kde je zapotřebí stálá dodávka elektrické energie se využívají zařízení jménem záložní zdroje elektrické energie neboli UPS (Uninterruptible Power Supply). Systémy UPS jsou navrženy pro dodávku elektrické energie v místech, kde nesmí dojít k výpadku sítě nebo zakolísání napětí, tyto zařízení opět využívají topologii napětového střídače.

1 MATLAB

Název MATLAB vznikl z anglického MATrix LABoratory. MATLAB je interaktivní systém jehož základním datovým typem je dvourozměrné pole (bez nutnosti deklarovat rozměry). Tyto vlastnosti spolu s množstvím zabudovaných funkcí umožňuje relativně snadný zápis a řešení mnoha technických problémů, speciálně takových, které vedou na vektorovou či maticovou formulaci, v mnohem kratším čase než řešení v klasických jazycích jako je "C" nebo FORTRAN [4].

1.1 Oblasti použití MATLABu

Typické oblasti použití jsou:

- inženýrské výpočty
- vývoj algoritmu
- modelování, simulace a vývoj prototypů
- analýza dat a jejich vizualizace
- inženýrská grafika
- vývoj aplikací včetně tvorby grafického uživatelského rozhraní [4].

1.2 Vhodné použití MATLABu

V případě, že potřebuji robustní výpočty, nestandardně jednorázově zpracovávat rozsáhlé datové soubory, pracovat s velkými maticemi a vůbec v případech, kdy řešení problému se dá převést na vektorové či maticové operace. Vzhledem k možnostem programování je MATLAB s výhodou použitelný i v případech rozvětvených případně iteračních algoritmů řešení. Nezanedbatelnou výhodou je i to, že díky jednoduchému ovládání lze po cca 6 hodinách s MATLABem samostatně pracovat a řešit jednodušší příklady [4].

1.3 Nevhodné použití MATLABu

MATLAB není vhodné používat v situacích, kdy potřebujeme provádět opakovaně stále stejné (byť složité) výpočty nebo opakovaně zpracovávat velké objemy dat. Zkrátka v situacích, kdy je rozhodující vlastní rychlost výpočtu a ne vývoj algoritmu výpočtu [4].

2 Napětové střídače

Tato kapitola pojednává o principu činnosti jednofázového napětového střídače, způsoby jeho napájení. Dále poskytuje informace o výkonových spínacích součástkách používaných při konstruování měničů.

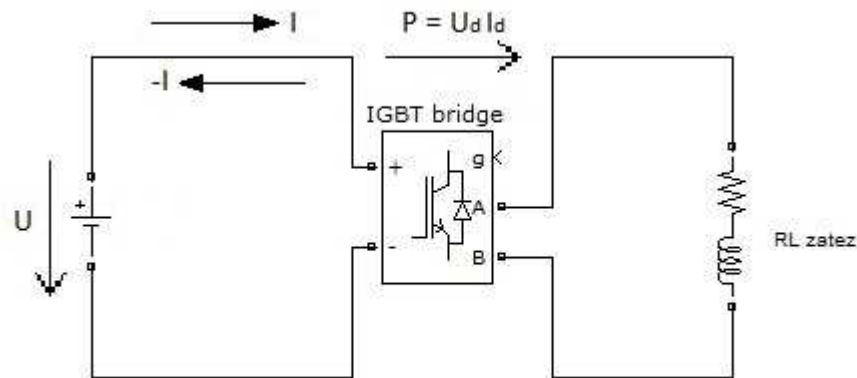
Napětové střídače jsou polovodičové bezkontaktní měniče určené k přeměně stejnosměrné energie na energii střídavou, kdy se změna děje plynule a prakticky bez časového zpoždění. Střídač je napájen zdrojem stejnosměrného napětí (charakteristický velkou kapacitou na vstupu střídače) nebo z proudového zdroje (charakteristický velkou indukčností na vstupu střídače). Schopnost napětového zdroje poskytovat energetické pulzy bez poklesu napětí je zvýšena vstupním filtrem. Návrh vstupního filtru zajistí stabilitu stejnosměrného napětí v tzv. „mezi-obvodu“. Zdroj napětí může být realizován např. oloveným akumulátorem, řízeným či neřízeným usměřňovačem napájeným z elektrorozvodné sítě, solárními články a ostatními zdroji stejnosměrného napětí.

Použijeme-li jako zdroj elektrické energie elektrorozvodnou síť. Musíme před usměřňovač zařadit odrušovací filtry. Usměřňovače jsou zdrojem vysokofrekvenčního rušení, které je z hlediska elektromagnetické kompatibility nutné odrušit.

2.1 Bilance výkonů

Budeme uvažovat ideální zdroj napětí U . Průchod činného a jalového výkonu střídače je v dalším vysvětlen na obrázku 1.2 se symbolicky naznačeným napětovým střídačem. Uvažujeme-li zdroj konstantního napětí U a střední hodnotu proudu I pak výkon odebíraný zdroji U a dodávaný zátěži je

$$P = U_d I_d \quad (1.1)$$



Obr. 2.1 – Schéma toku energie napětovým střídačem

Změna polarity napětí na svorkách stejnosměrné strany střídače je nepřijatelná, mění se pouze smysl proudu I_d .

$$P > 0 \rightarrow I_d > 0 - \text{Střídačový chod}$$

$$P < 0 \rightarrow I_d < 0 - \text{Usměrňovačový chod}$$

Okamžitá hodnota výkonu odebíraného ze stejnosměrného zdroje je dána vztahem

$$p = U_d i_d = \sum_{n=1}^m p_n \quad (1.2)$$

v němž i_d je okamžitá hodnota proudu ve stejnosměrném obvodu, p_n je okamžitá hodnota výkonu odebíraného n -tou fází m -fázové zátěže. U jednofázového střídače se odběr jalového výkonu zátěží projevuje periodickými změnami smyslu i_d [1].

Shrneme-li výše uvedené poznatky, konstrukce napětového střídače musí umožňovat průchod proudu v obou směrech. Kladný smysl proudu i_d umožňují vypínatelné součástky (IGBT, GTO, atd.), záporný smysl proudu i_d umožňují tzv. zpětné diody. Zpětná dioda je antiparalelně připojena ke každé vypínatelné součástce napětového střídače. Jako celek tvoří zpětné diody tzv. zpětný usměrňovač [1].

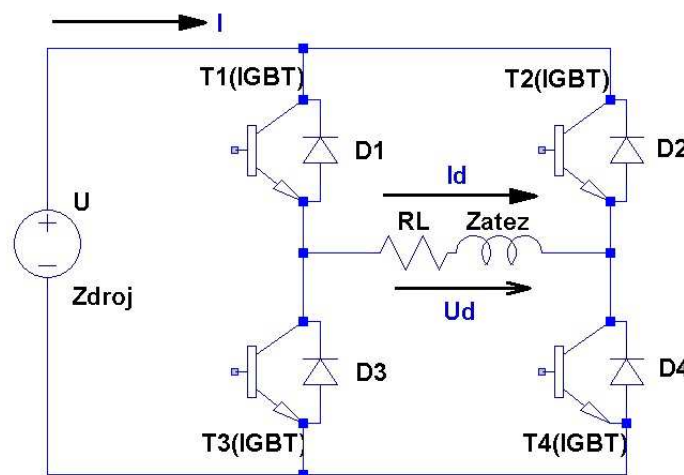
2.2 Spínací prvky používané ve výkonových měničích

V současné době se ve výkonových měničích v drtivé většině využívají výkonové tranzistory. V minulosti jsme se mohli setkat s tyristory ale v dnešní době sotva konkurují používaným IGBT tranzistorům.

- Tyristor - je polovodičová součástka obsahující tři PN přechody, spínána kladným impulzem proti katodě.
- Výkonový bipolární tranzistor - je polovodičová součástka se třemi sousedními odlišně dotovanými oblastmi oddělenými dvěma PN přechody. Tranzistory se využívají ke spínání nebo zesilování proudu.
- Výkonový tranzistor řízený polem (FET) - obsahuje polovodičový kanál, vedoucí elektrický proud, jehož odpor je ovládán elektrickým polem působícím kolmo na proud. Vedení proudu se zúčastňují pouze majoritní nosiče (elektrony nebo díry). Velkou výhodou těchto tranzistorů je velký vstupní odpor oproti bipolárním.
- Vypínací tyristor GTO - je optimalizován pro nízké ztráty ve vedení. Dosahuje velké spínací frekvence až 500 Hz. Pro zapnutí se využívá kladný, pro vypnutí záporný řídicí impuls.
- Bipolární tranzistor s izolovanou řídicí elektrodou (IGBT)
- Tyristor řízený integrovanou řídicí elektrodou (IGCT)
- Static Induction Transistor (SIT) - Tento tranzistor je svou charakteristikou velice podobný vakuové diodě
- Static Induction Thyristor (SITH) - je plně říditelný tyristor, podobný GTO. Liší se však od něj vyššími hodnotami $\frac{du}{dt}$, $\frac{di}{dt}$ a kratšími spínacími časy
- MOS Controlled Thyristor (MCT) - je zapínán i vypínán krátkým napěťovým pulzem do řídicí elektrody struktury MOS. Svými parametry je srovnatelný s tranzistorem IGBT avšak MCT má menší úbytek napětí v sepnutém stavu

2.3 Popis činnosti napětového střídače

Jednofázový střídač lze zkonstruovat pomocí čtyř-kvadrantového pulzního měniče, H-můstku (obr. 2.2). Střídač je připojen na stejnosměrný zdroj U . Obecně lze použít jakékoli vypínatelné součástky popsané v kapitole 2.2, v tomto případě jsou použity IGB Tranzistory (T1-T4) s antiparalelně připojenými diodami (D1-D4).



Obr. 2.2 – Schéma zapojení DC/AC napětového střídače

Pro popsání principu činnosti napětového střídače uvažujeme odporově-induktivní charakter zátěže. Je několik způsobů v jakých kombinacích lze spínat tranzistory. Výsledkem však musí být kladné a záporné napětí na zátěži. Tím se docílí střídavým spínáním tranzistorů T1, T4 a tranzistorů T2, T3. Pokud jsou sepnuty tranzistory T1 a T4 skokově se na zátěži objeví napětí zdroje ($U=U_d$), to můžeme odvodit z rovnice (1.1). Pro odporově-induktivní zátěž platí, že stavová veličina je proud a proto se mění spojitě, naproti tomu se napětí bude měnit skokově. Proud i_d exponenciálně poroste na hodnotu $\left(\frac{U_d}{R}\right)$, průběh proudu je dán vztahem (1.4). Časová konstanta zátěže je τ (1.5)

$$u_{d(t)} = Ri_{d(t)} + L \frac{di_{d(t)}}{dt} \quad (1.3)$$

$$i_{d(t)} = \frac{U_d}{Z} e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{U_d}{Z} \quad (1.4)$$

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (1.5)$$

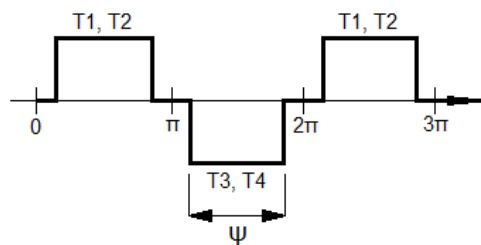
V následujícím taktu se sepnou tranzistory T2 a T3 na zátěži se skokově změní napětí na ($U=-U_d$) avšak vlivem indukčnosti zátěže se proud i_d uzavírá přes diody D2 a D3. Až když proud i_z klesne na nulu, teprve pak začne procházet proud i_z tranzistory T2 a T3 ten exponenciálně klesá na hodnotu ($-\frac{U_d}{R}$). V následujícím taktu se sepnou tranzistory T1 a T4 na zátěži se skokově změní napětí na ($U=U_d$) avšak vlivem indukčnosti zátěže se proud i_d uzavírá přes diody D1 a D4. Až když proud i_d klesne na nulu, teprve pak začne procházet proud i_d tranzistory T1 a T2 ten exponenciálně klesá na hodnotu ($\frac{U_d}{R}$). Tímto způsobem se průběh proudu opakuje [1].

Jednotlivé prvky střídače lze zapnout a vypnout v libovolném čase, je to díky tomu, že každý prvek má svůj komutační obvod. Způsobem zapínání a vypínání řídíme výstupní frekvenci a velikost výstupního napětí. Obecně lze říci, že každou dvojici T1, T4 a T2, T3 můžeme otevřít v intervalu $0 < \psi < \pi$. Výstupní napětí je obdélníkového tvaru, pro jehož efektivní hodnotu platí

$$U_d = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_d^2 dx} = U \sqrt{\frac{\psi}{\pi}} \quad (1.6)$$

pro efektivní hodnotu proudu zátěže bude platit

$$I_d = \frac{U_d}{Z} \sqrt{\frac{\psi}{\pi}} \quad (1.7)$$



Obr. 2.3 – průběh spínacího pulzu

Průběh u_z lze vyjádřit prostřednictvím vyšších harmonických složek. S uvažováním, že průběh představuje lichá funkce souměrná podle osy x je [1]

$$U_{Z(n)} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} B_{(n)} \sin n_x \quad (1.8)$$

$$B_{(n)} = U_{Zm(n)} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u_Z \sin nxdx = \frac{4U_d}{\pi n} \cos\left(n \frac{\pi-\psi}{2}\right) \quad (1.9)$$

$B_{(n)} = U_{Zm(n)}$ je amplituda n -té harmonické [1].

Efektivní hodnoty jednotlivých harmonických jsou

$$U_{Z(n)} = \frac{2\sqrt{2}U_d}{\pi n} \cos\left(n \frac{\pi-\psi}{2}\right) \quad (2.0)$$

Jednotlivé harmonické složky proudu jsou určeny příslušnými harmonickými napětí a impedancemi $Z_{(n)}$ pro příslušné harmonické. Průběh i_Z lze pak opět vyjádřit prostřednictvím vyšších harmonických [1].

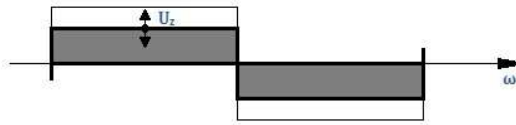
$$i_{Z(n)} = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{U_{Zm(n)}}{Z_{(n)}} \sin(nx + \varphi_{(n)}) \quad (2.1)$$

$$I_{Z(n)} = \frac{U_{Zm(n)}}{\sqrt{2}Z_{(n)}} \quad (2.2)$$

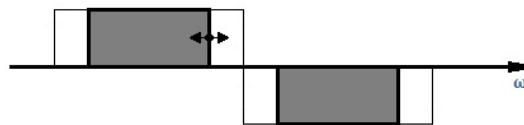
3 Způsoby řízení DC/AC měničů

V současné době je převážně používáno šířkové pulzně modulované řízení a řidčeji též šířkové pulzní řízení. Obě tyto varianty řízení ve srovnání s ostatními vedou na příznivější skladbu vyšších harmonických výstupního napětí a proudů střídače. Obdélníkové řízení se používá u méně náročných aplikací, zpravidla tam, kde řízení výstupního napětí střídače není požadováno (konstantní výška a konstantní co největší šířka obdélníkové půlplny napětí). Je ovšem třeba poznamenat, že při šířkovém pulzním a pulzně modulovaném řízení se zpravidla nejvyššího výstupního napětí dosahuje prostým přechodem na obdélníkové řízení s maximální možnou šířkou obdélníkové půlplny. Principy řízení jsou názorně ilustrovány na obrázcích níže [1].

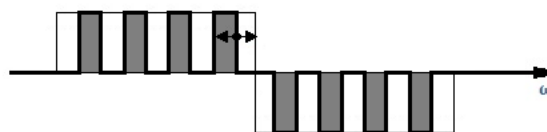
Obdélníkové amplitudové:



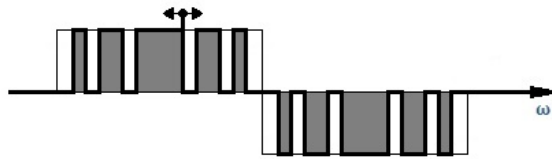
Obdélníkové šířkové:



Šířkové pulzní:



Šířkové pulzně modulované:



Řízení v kaskádě:

Využití kaskádního spojení střídačů je zde uvedeno pouze pro úplnost, běžně toto zapojení používáno není [1].

4 Simulace

Následující kapitola se zabývá simulací napětového střídače v prostředí MATLAB Simulink. Cílem je výběr a ověření funkčnosti navržených způsobů řízení.

Při simulacích budeme používat ideální spínací prvky, to znamená, že jsou zanedbány spínací ztráty součástek a ztráty vzniklé průchodem proudu, dále jsou zanedbány mrtvé časy, které jsou u reálného měniče.

4.1 Obdélníkové šířkové řízení při $\Psi = \pi$

Princip spínání výkonových prvků a průběhy proudu a napětí na zátěži je popsáno v kapitole 2.3. Úhel Ψ je délka pulsu který je přiveden na polovodičové spínače. Skutečné sepnutí polovodičových součástek je však jiné. Ψ_S označíme skutečné sepnutí polovodičových spínačů. Ψ_R je interval, kdy se proud uzavírá zpětnými diodami. Úhel Ψ_R je závislý na charakteru zátěže. Při čistě odporové zátěži je $\Psi_R = 0$. Při zátěži RL se Ψ_R pohybuje v rozmezí $< 0, \frac{\pi}{2}$).

Parametry prvků simulace:

$f = 500, 2000\text{Hz}$ – Spínací frekvence tranzistorů

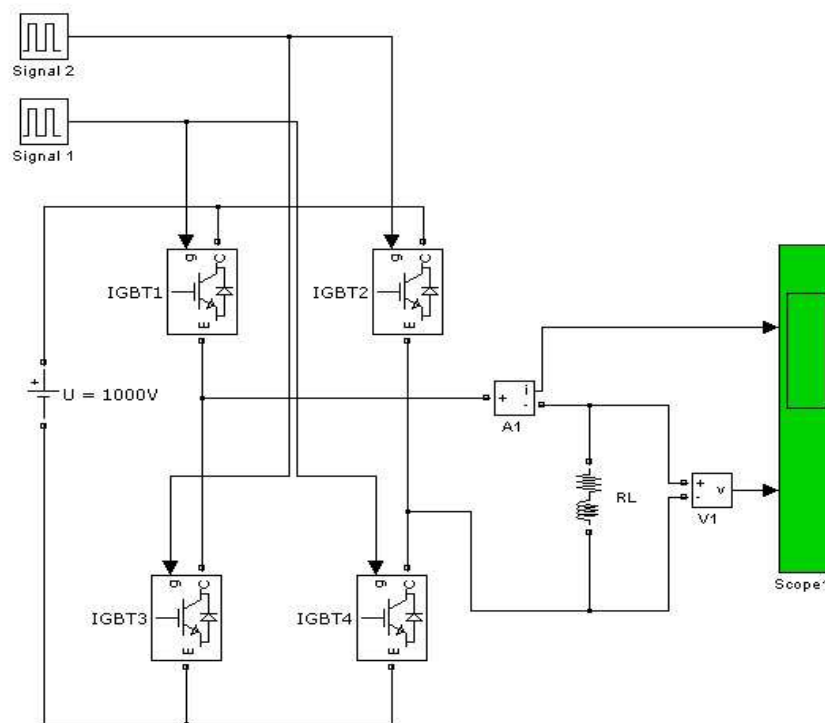
$U = 1000\text{V}$ – napětí stejnosměrného zdroje

Z: $R = 10\Omega, L = 5\text{mH}$

Parametry simulace:

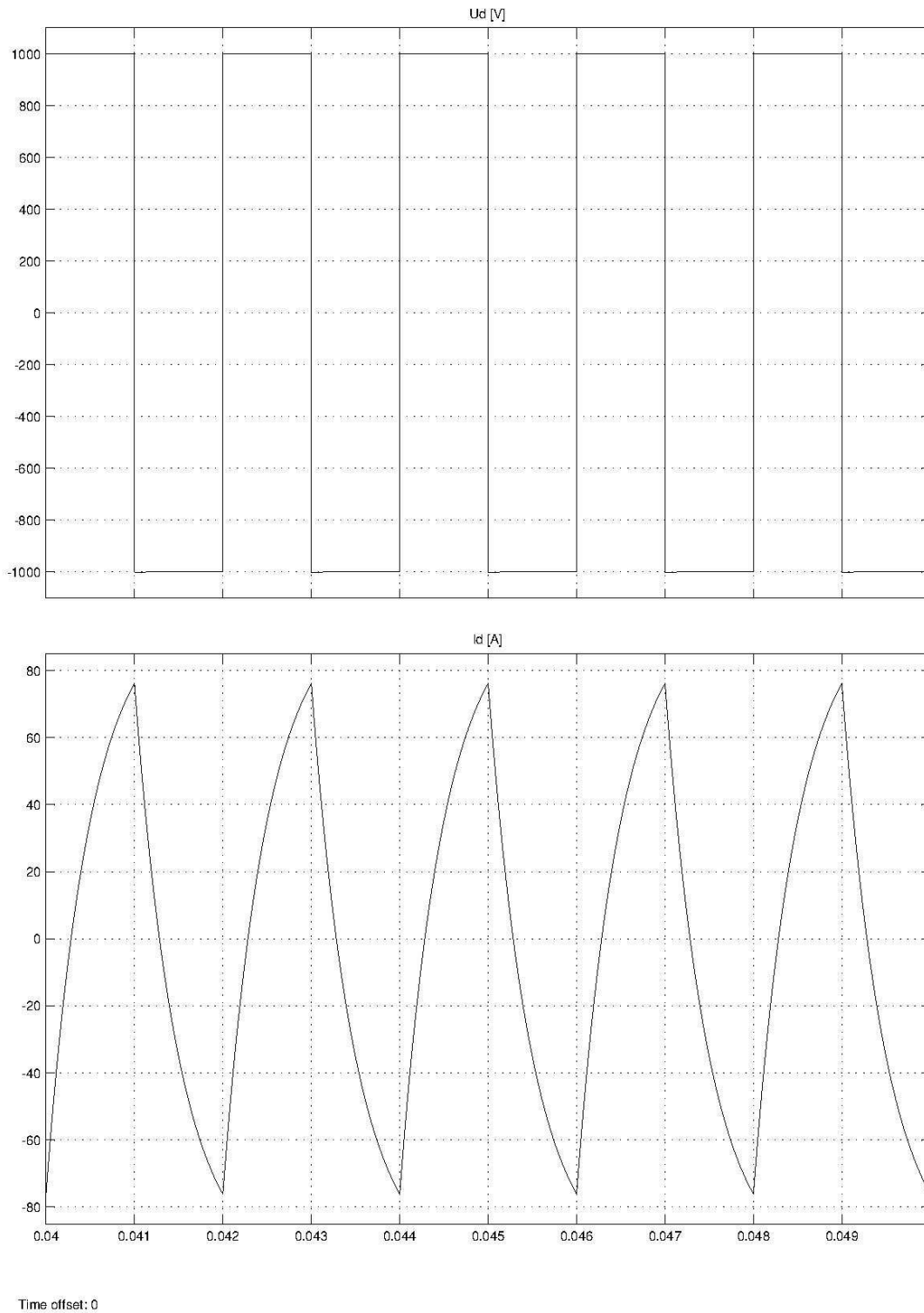
Simulace je nastavena na 0,1s, simulace je diskrétní s krokem simulace 10^{-7}s . Zátěž je odporově-induktivního charakteru, kde R je 10Ω a L je 5mH . Budeme simulovat průběhy napětí a proudu na zátěži při spínací frekvenci polovodičových

výkonových tranzistorů 500 a 2000Hz. Schéma zapojení napěťového střídače je na obr. 4.1.



Obr. 4.1 – schéma DC/AC napěťového střídače v prostředí MATLAB Simulink při obdélníkovém řízení

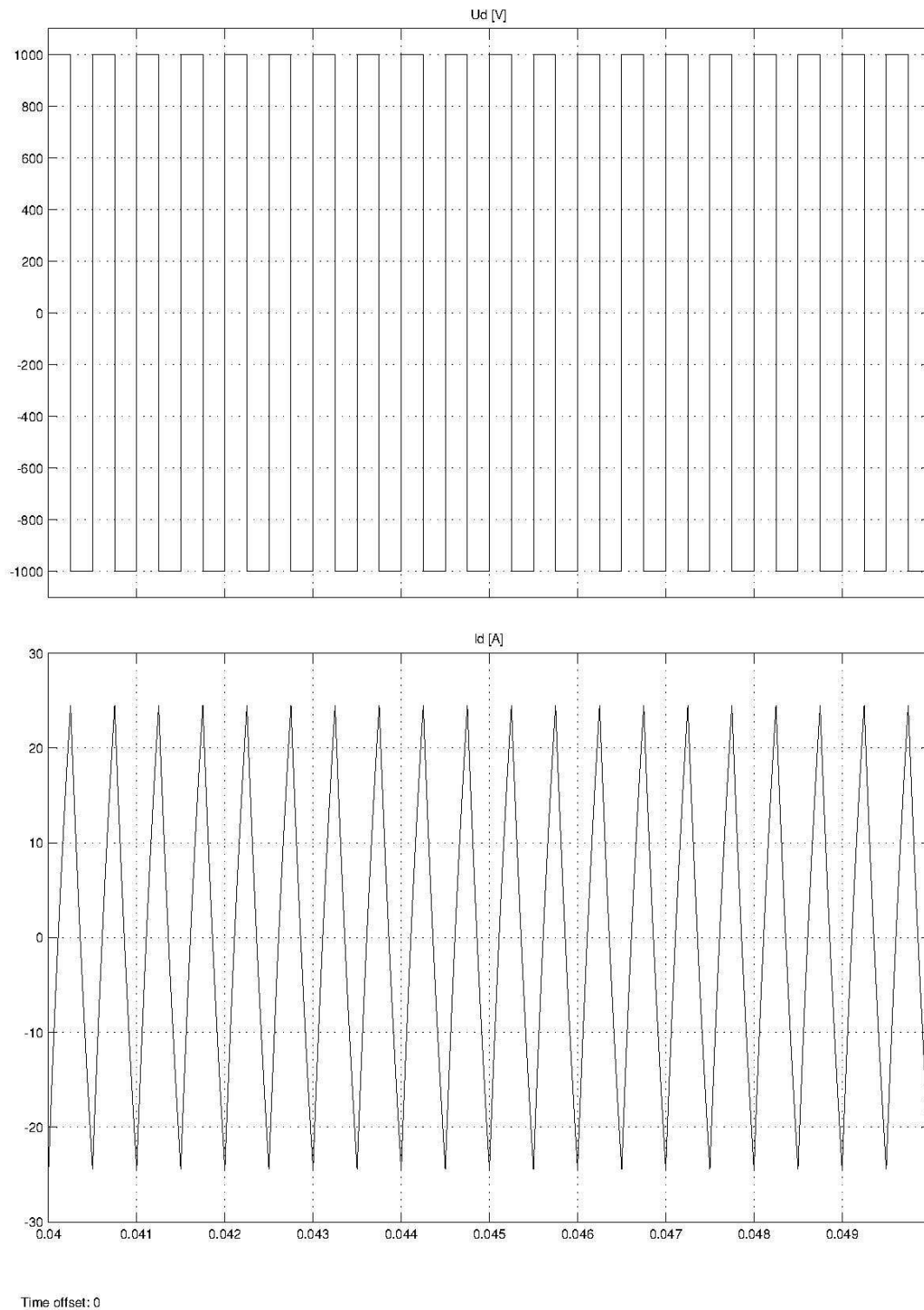
Na obr. 4.2 jsou vykresleny průběhy napětí a proudu zátěže napětového střídače při obdélkovém řízení při $f = 500\text{Hz}$, $U = 1000\text{V}$, $R = 10\Omega$ a $L = 5\text{mH}$.



Obr. 4.2 – Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB

Simulink při $f = 500\text{Hz}$

Na obr. 4.3 jsou vykresleny průběhy napětí a proudu zátěže napětového střídače při obdélkovém řízení při $f = 2000\text{Hz}$, $U = 1000\text{V}$, $R = 10\Omega$ a $L = 5\text{mH}$.



Obr. 4.3 – Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB

Simulink při $f = 2000\text{Hz}$

4.2 Obdélníkové šířkové řízení při $\Psi < \pi$

Parametry prvků simulace:

$f = 500\text{Hz}$ – Spínací frekvence tranzistorů

$\Psi = 70\%$ z *periody*

$U_d = 1000\text{V}$ – napětí stejnosměrného zdroje

Z: $R = 10\Omega$, $L = 5\text{mH}$

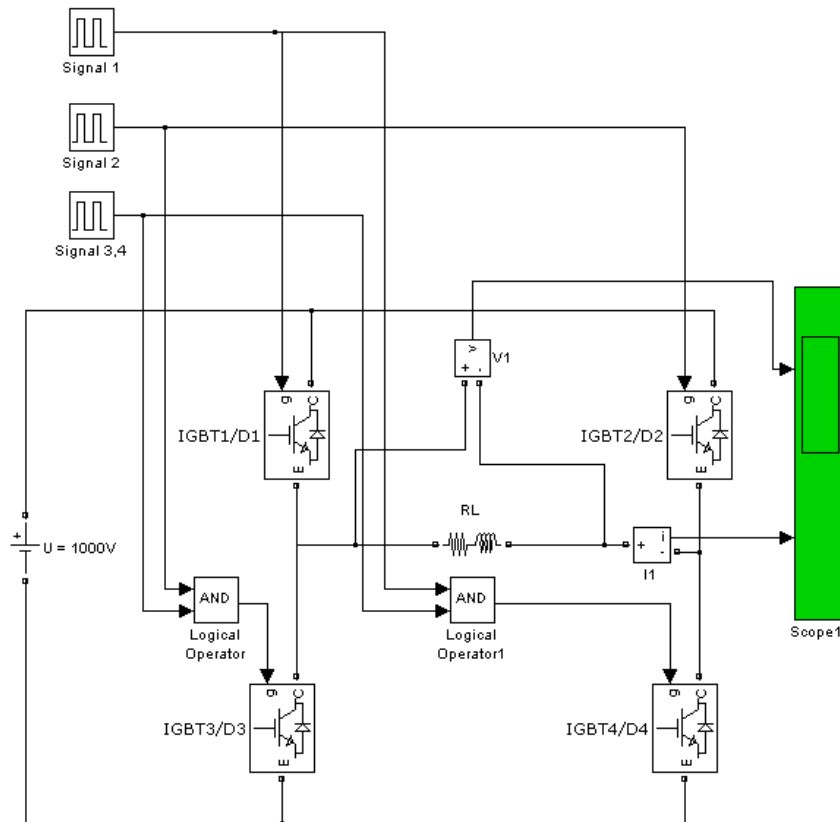
Parametry simulace:

Simulace je nastavena na 0,1s, simulace je diskrétní s krokem simulace 10^{-7}s . Zátěž je odporově-induktivního charakteru, kde R je 10Ω a L je 5mH. Budeme simulovat průběhy napětí a proudu na zátěži při spínací frekvenci polovodičových výkonových tranzistorů 2 a 10kHz. Schéma zapojení napětového střídače je na obr. 4.1.

Řízením Ψ v rozsahu 0 až π lze řídit napětí na zátěži, jak bylo řečeno v kapitole 2.3. Řídí-li se Ψ všech spínačů, vychází nepříznivá křivka napětí na zátěži, popsáno v kapitole 4.1. Jednofázový můstek umožňuje řízení Ψ jen u dvou spínačů s tím, že u druhých dvou zůstává $\Psi = \pi$. Křivka napětí na zátěži tak vychází mnohem příznivěji. Spínací diagram, proudové a napětové poměry takto řízeného střídače jsou vykresleny na obr. 4.2. Sledujme a popišme několik taktů.

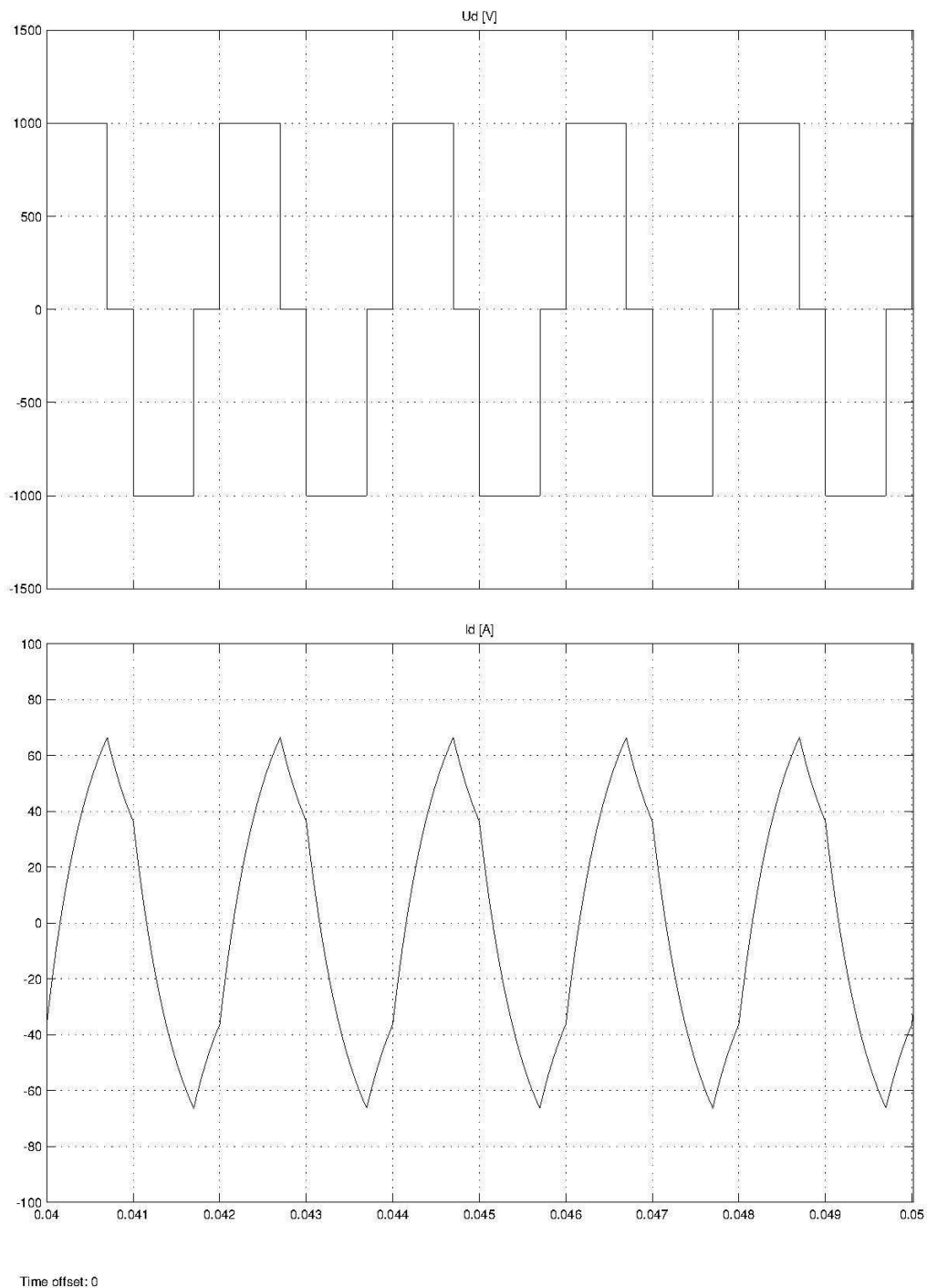
Mějme spínací frekvenci tranzistorů 500Hz a $\Psi = 70\%$ z *periody*. V prvním případě teče proud zátěže ze zdroje přes tranzistory T1 a T4, v následujícím taktu, kdy je tranzistor T4 zavřen proud zátěže se nemůže uzavírat nikudy jinudy než přes tranzistor T1 a zpětnou diodu D2. Proud zátěží v tomto taktu je dán indukčností zátěže a energie v ní akumulované. V taktu kdy jsou otevřeny tranzistory T2 a T3 udržuje indukčnost zátěže na těchto tranzistorech závěrné napětí do doby, než klesne proud zátěží k nule, do té doby se proud zátěže uzavírá pře diody D2 a D3. V následujícím taktu jsou tranzistory T2 a T3 otevřeny, proud se uzavírá ze zdroje přes tyto dva tranzistory a zátěž. V taktu kdy je sepnut tranzistor T2 a tranzistor T3 zavřen se proud uzavírá přes tranzistor T2 a diodu D1. V taktu kdy se opět sepnou tranzistory T1 a T4

musí nejdříve proud zátěží klesnout k nule v původním směru. Proud je vyvolaný indukčností zátěže a je orientován v původním směru, proud se uzavírá přes diody D1 a D4.



Obr. 4.4 – schéma DC/AC napětového střídače v prostředí MATLAB *Simulink* při obdélníkovém řízení při $\Psi = 70\%$ z *periody*

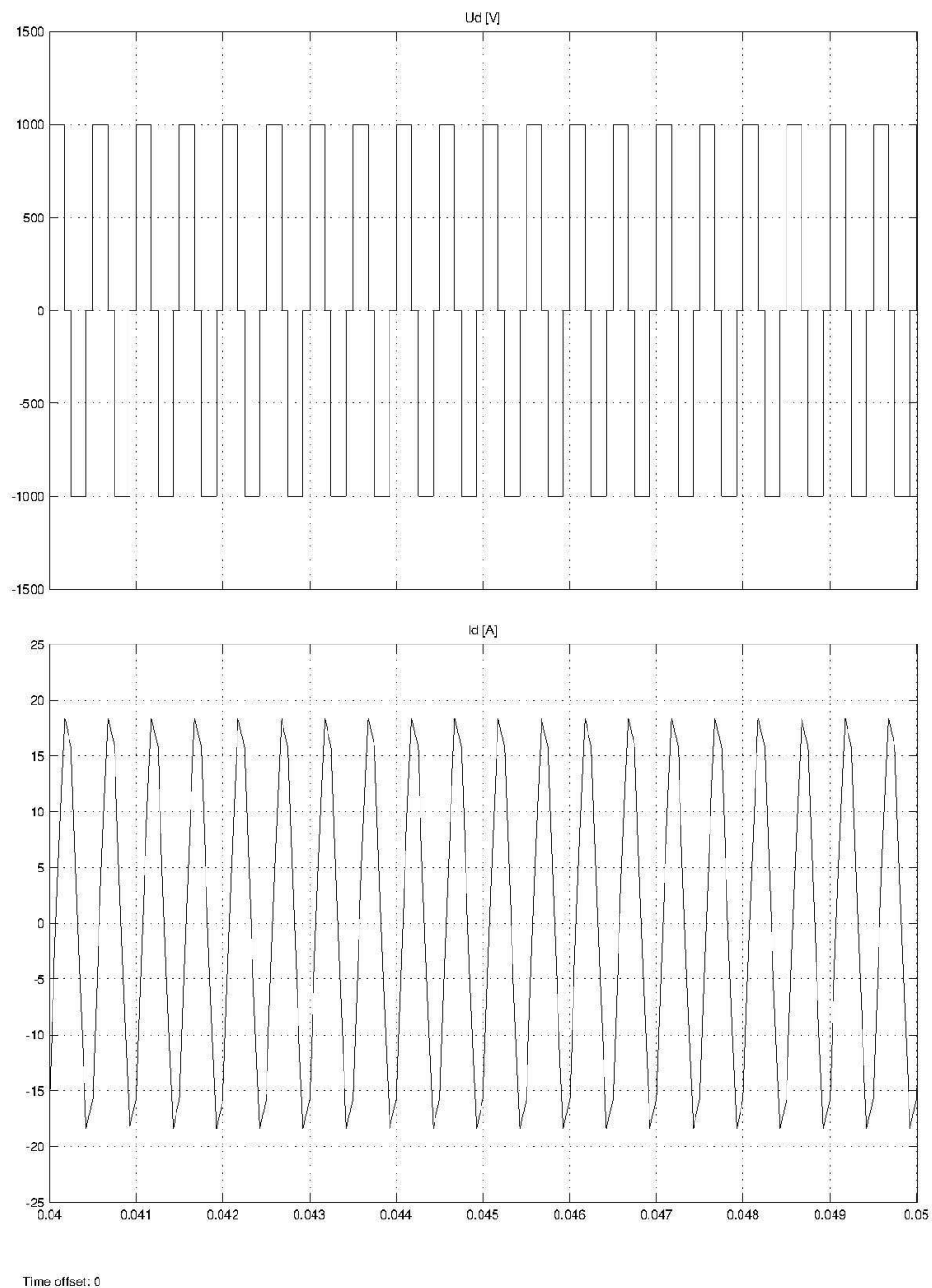
Na obr. 4.5 jsou vykresleny průběhy napětí a proudu zátěže napětového střídače při obdélníkovém řízení při $f = 500\text{Hz}$, $\Psi = 70\%$ z *periody*, $U = 1000\text{V}$, $R = 10\Omega$ a $L = 5\text{mH}$.



Obr. 4.5 – Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB

Simulink při $f = 500\text{Hz}$ a $\Psi = 70\%$ z *periody*

Na obr. 4.6 jsou vykresleny průběhy napětí a proudu zátěže napětového střídače při obdélníkovém řízení při $f = 2000\text{Hz}$, $\Psi = 70\%$ z periody, $U = 1000\text{V}$, $R = 10\Omega$ a $L = 5\text{mH}$.



Obr. 4.6 – Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB Simulink při $f = 2000\text{Hz}$ a $\Psi = 70\%$ z periody

4.3 Šířkové pulzní řízení

Při šířkovém pulzním řízení můžeme použít dva druhy spínání polovodičových prvků. V prvním případě můžeme spínat polovodičové prvky v rozmezí U_d a $-U_d$. To je nevýhodné, neboť se tím v rytmu pulsu zbytečně periodicky vyměňuje energie mezi indukčností zátěže a stejnosměrným zdrojem. Tato nevýhoda je odstraněna tím, že v každé půlčlenně se okamžitá hodnota výstupního napětí střídače mění jen mezi nulou a hodnotou U_d , v kladné půlčlenně nebo hodnotou $-U_d$, v záporné půlčlenně [1].

Parametry prvků simulace:

$$f_{T1,T2} = 500\text{Hz} - \text{spínací frekvence tranzistorů T1 a T2}$$

$$f_{T3,T4} = 5 \text{ a } 20\text{kHz} - \text{spínací frekvence tranzistorů T3 a T4}$$

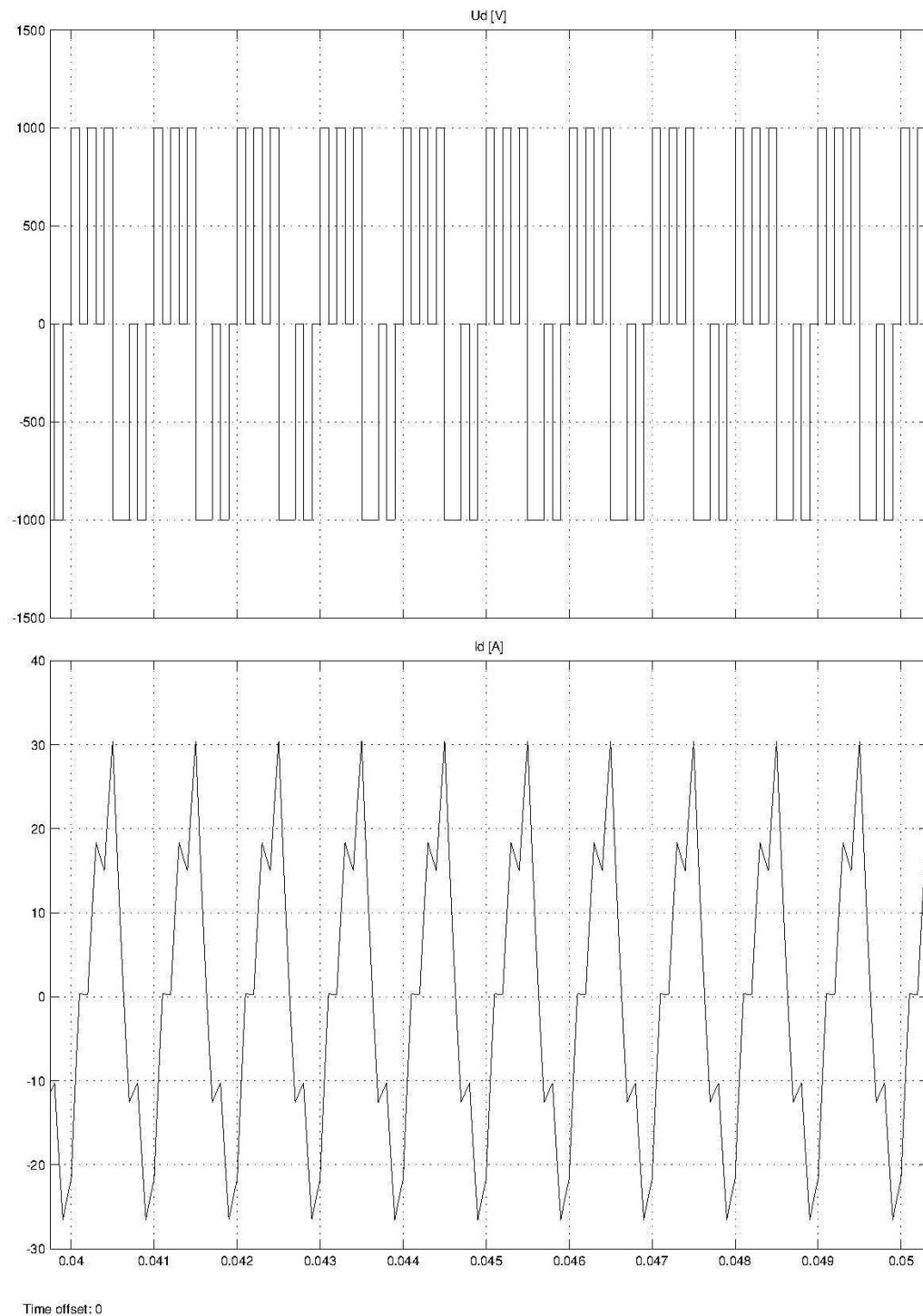
$$U_d = 1000\text{V} - \text{napětí stejnosměrného zdroje}$$

$$Z: R = 10\Omega, L = 5\text{mH}$$

Parametry simulace:

Simulace je nastavena na 0,1s, simulace je diskrétní s krokem simulace 10^{-7} s. Zátěž je odporově-induktivního charakteru, kde R je 10Ω a L je 5mH. Budeme simulovat průběhy napětí a proudu na zátěži při spínací frekvenci polovodičových výkonových tranzistorů T1 a T2 je 500Hz, spínací frekvence tranzistorů T3 a T4 je 5 a 20kHz.

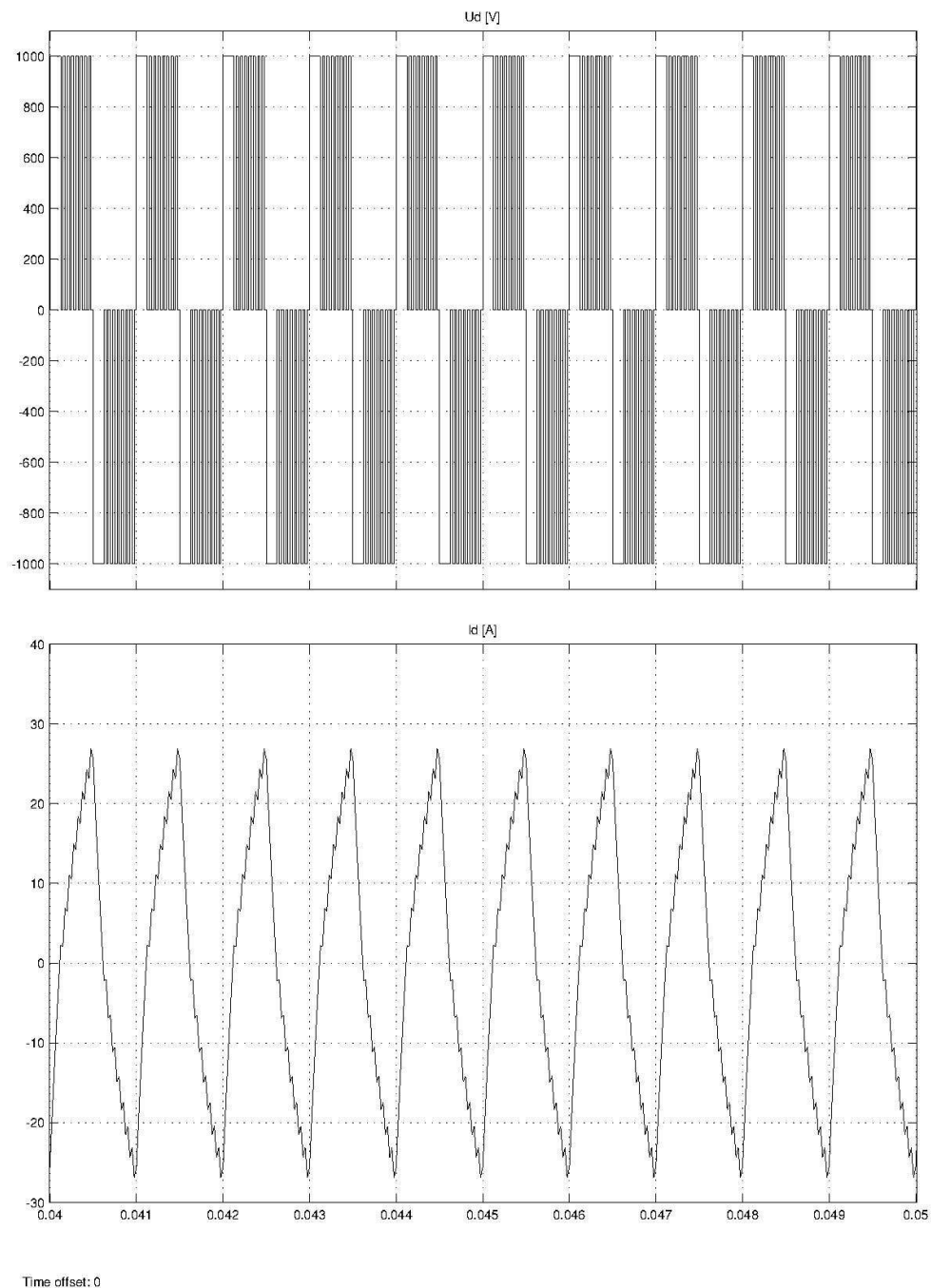
Na obr. 4.7 jsou vykresleny průběhy napětí a proudu zátěže napětového střídače při šířkovém pulzním řízení při $f_{T1,T2} = 500\text{Hz}$, $f_{T3,T4} = 5000\text{Hz}$, $U = 1000\text{V}$, $R = 10\Omega$ a $L = 5\text{mH}$.



Obr. 4.7 – Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB

Simulink při $f_{T1,T2} = 500\text{Hz}$, $f_{T3,T4} = 5000\text{Hz}$

Na obr. 4.8 jsou vykresleny průběhy napětí a proudu zátěže napětového střídače při šířkovém pulzním řízení při $f_{T1,T2} = 500\text{Hz}$, $f_{T3,T4} = 20\,000\text{Hz}$, $U = 1000\text{V}$, $R = 10\,\Omega$ a $L = 5\text{mH}$.



Obr. 4.8 – Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB

Simulink při $f_{T1,T2} = 500\text{Hz}$, $f_{T3,T4} = 20\text{kHz}$

4.4 Šířkové pulzně modulované řízení

Komparátor porovnává vysokofrekvenční nosný signál ve tvaru pily s požadovaným sinusovým signálem o frekvenci, kterou požadujeme na výstupu napětového střídače. Modulací těchto dvou signálů vzniknou obdélníky různé šířky. Požadované výstupní napětí je v tomto případě funkce sinus, u které se mění velikost amplitudy v závislosti na požadovaném výkonu. Odpovědnost za velikost amplitudy sinusového signálu má regulátor ve spolupráci s řídicí jednotkou (např. signálovým procesorem).

Pulzy se dále zpracovávají v kombinačních a sekvenčních obvodech. Kombinační a sekvenční obvody jsou součástí budících obvodů tranzistorů, které zajišťují jejich velmi rychlé spínání.

Požadujeme na výstupu hladké výstupní napětí. Demodulace napětových pulzů zajišťuje výstupní filtr, typu dolnofrekvenční propust. Filtr typu dolnofrekvenční propust se buď dá realizovat L filtrem, nebo LCL filtrem. Je-li zátěž například točivý stroj, zátěž typu RL je indukčnost L přímo filtrem (v případě malé hodnoty L se vkládá přídatná indukčnost). V realitě však bude vždy výstupní napětí obsahovat vyšší harmonické, které se projeví jako větší nebo menší zvlnění superponované na výsledném sinusovém proudu. Zvlnění proudu, které je dané spínáním měniče je možné ovlivnit volbou spínací frekvence, případně velikostí a kvalitou výstupního filtru.

Parametry prvků simulace:

$f_{pila} = 1 \text{ a } 5kHz$ – frekvence pilového signálu

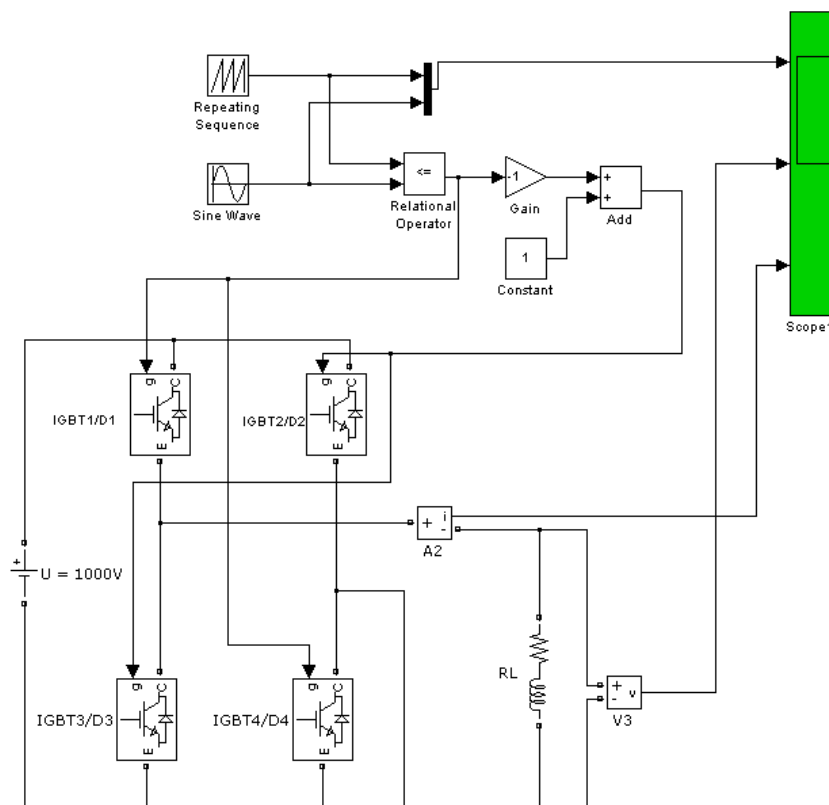
$f_{50} = 50Hz$ – požadovaný sinusový signál

$U_d = 1000V$ – napětí stejnosměrného zdroje

Z: $R = 10\Omega$, $L = 5mH$

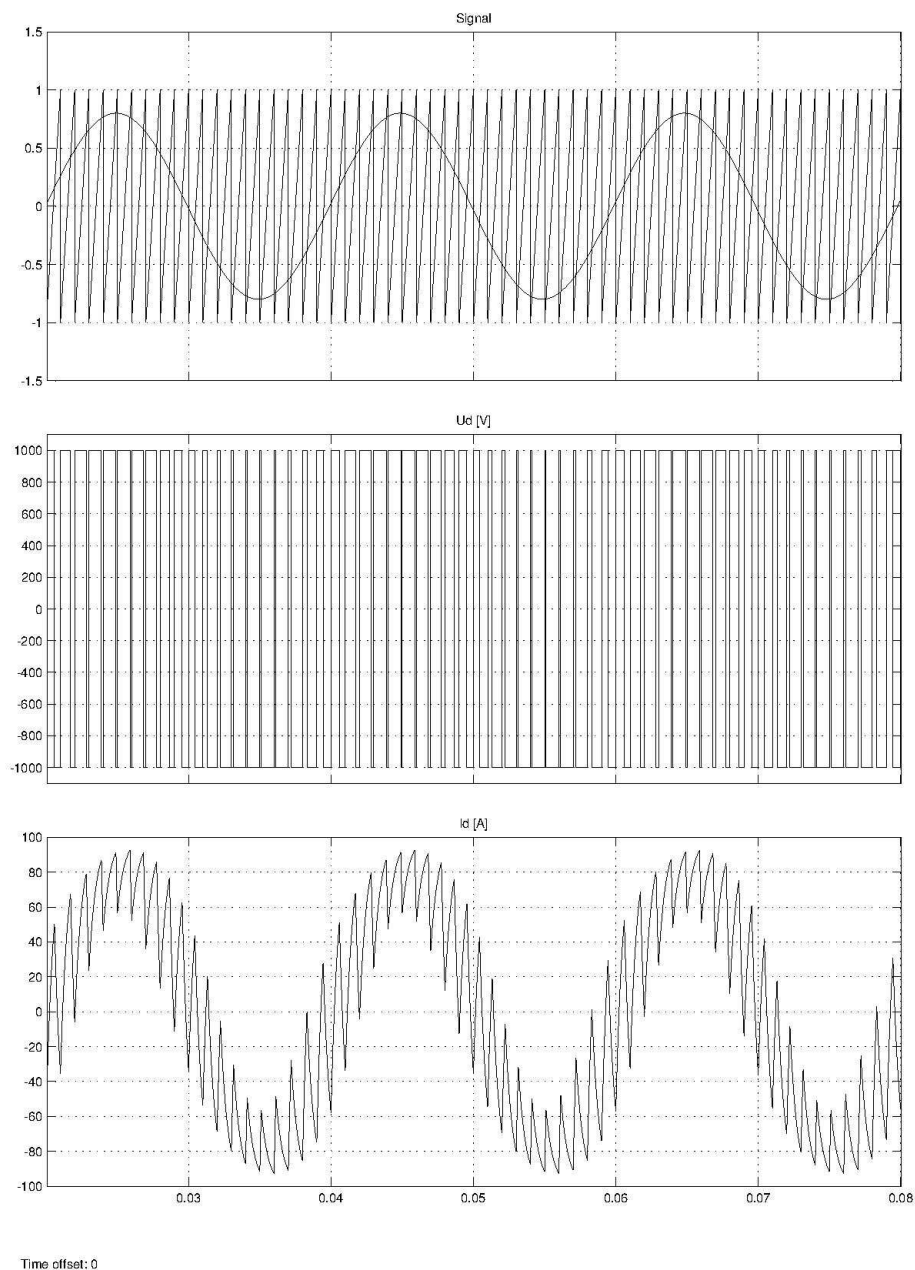
Parametry simulace:

Simulace je nastavena na 0,1s, simulace je diskrétní s krokem simulace 10^{-7} s. Zátěž je odporově-induktivního charakteru, kde R je 10Ω a L je 5mH. Budeme simulovat průběhy napětí a proudu na zátěži. Vysokofrekvenční signál (pila) je 1 a 5kHz, požadovaný signál je sinusový s frekvencí 50Hz.



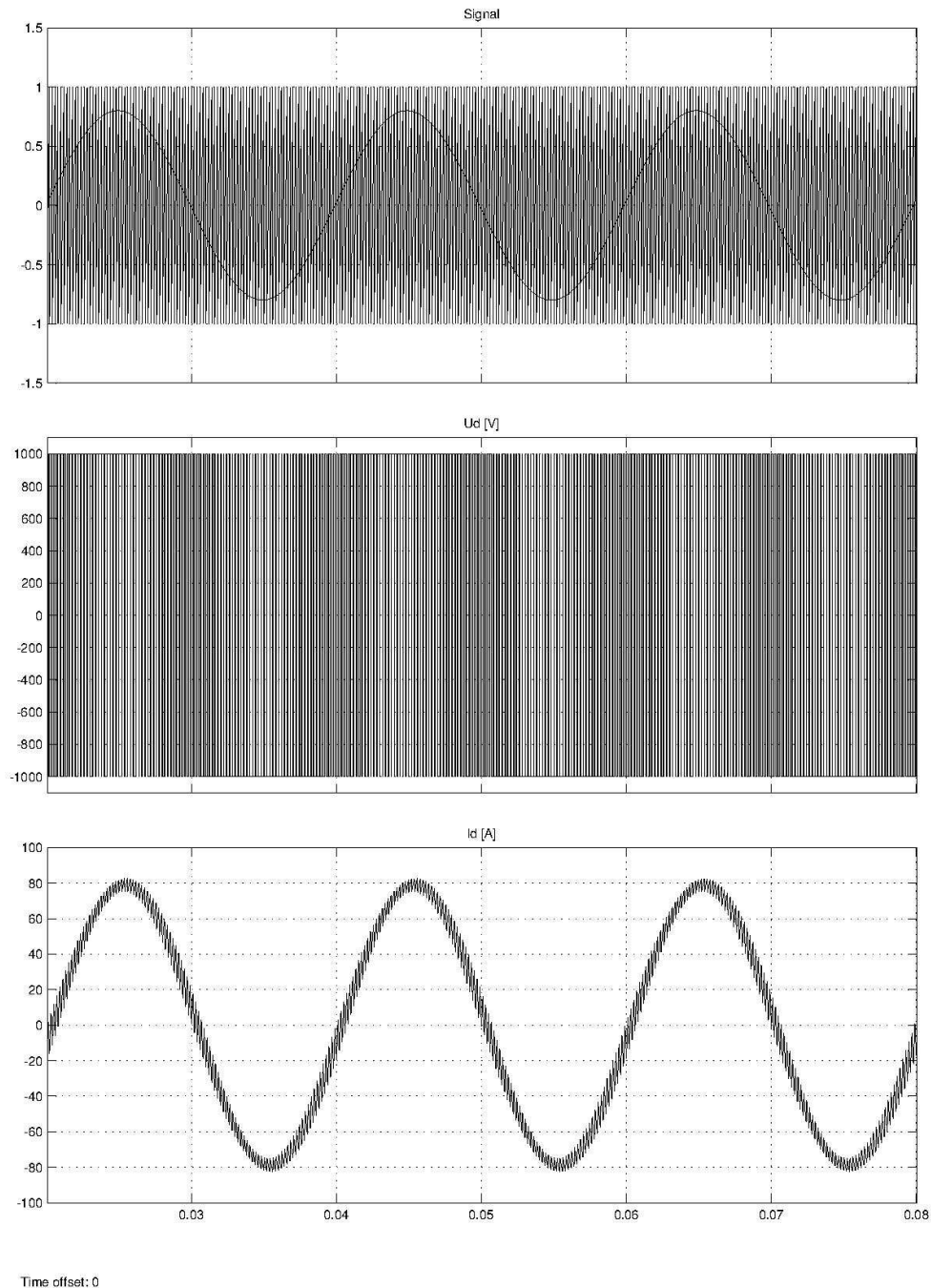
Obr. 4.9 - schéma DC/AC měniče v prostředí MATLAB *Simulink* při širkovém pulzně modulovaném řízení

Na obr. 4.10 jsou vykresleny průběhy napětí a proudu zátěže napětového střídače při pulzně modulovaném řízení při $f_{pila} = 1000\text{Hz}$, $f_{50} = 50\text{Hz}$, $U = 1000\text{V}$, $R = 10\Omega$ a $L = 5\text{mH}$.



Obr. 4.10 – Graf pilového a žádaného sinusového signálu. Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB Simulinku řízeného pulzně šířkovou modulací při $f_{pila} = 1\text{kHz}$

Na obr. 4.11 jsou vykresleny průběhy napětí a proudu zátěže napětového střídače při pulzně modulovaném řízení při $f_{pila} = 5000\text{Hz}$, $f_{50} = 50\text{Hz}$, $U = 1000\text{V}$, $R = 10\Omega$ a $L = 5\text{mH}$.



Obr. 4.11 – Graf pilového a žádaného sinusového signálu. Grafy průběhu napětí a proudu na zátěži simulované v prostředí MATLAB *Simulinku* řízeného pulzně šířkovou modulací při $f_{pila} = 5\text{kHz}$

5 Závěr

V této bakalářské práci bylo nasimulováno několik způsobů řízení, od nejjednodušších po nejsložitější. První návrh řízení bylo obdélníkové šířkové řízení, šířkové pulzní řízení je simulováno v druhé části, závěrem bylo nasimulováno šířkové pulzní modulované řízení napětového střídače.

Výkonová část napětového střídače je zapojena jako H-můstek s IGBT tranzistory a antiparalelně připojenými diodami ke každému výkonovému tranzistoru. Jako celek tvoří tzv. zpětný usměrňovač. Zátěž je odporově-induktivního charakteru ($R = 10\Omega$, $L = 5\text{mH}$). Zdroj napětí je idealizovaný, to znamená, při zatížení neklesá napětí zdroje ($U = 1000\text{V}$).

Ze všech provedených simulací vychází nejpříznivěji průběh proudu zátěže šířkově pulzně modulované řízení s $f_{pila} = 5\text{kHz}$ *Kapitola 4.4*. Avšak musíme si uvědomit, že algoritmus řízení je poměrně dost složitý, proto se v méně náročných aplikacích používá šířkové pulzní řízení *Kapitola 4.3*. Dále můžeme říci, přihlédneme-li na obr. 4.10 a obr. 4.11, je-li frekvence pilového signálu vyšší, výsledný proud zátěže je vyhlazenější.

Přínosem této práce je funkční model řízení napětového střídače při obdélníkovém řízení, šířkově pulzním řízení a šířkově pulzně modulovaném řízení v prostředí MATLAB *Simulink*. Jako další možné směry vývoje práce, si lze představit zejména návrh *výstupního filtru* pro potlačení vyšších harmonických proudu a návrh *vstupního filtru*. Jak bylo řečeno v *Kapitole 2*, napětový střídač je zdrojem vysokofrekvenčního rušení, které je z hlediska elektromagnetické kompatibility nutné odrušit.

6 Použitá literatura

- [1] VONDRÁŠEK, František. Měniče s vlastní komutací a bez komutace. Svazek 3. Plzeň: tiskové středisko ZČU, 2003. ISBN 80-7082-980-X.
- [2] PAVELKA, Jiří, ČEŘOVSKÝ, Zdeněk. Výkonová elektrotechnika. Vydavatelství ČVUT, 2000.
- [3] SKALICKÝ, Jiří. Elektrické pohony a výkonová elektronika: současný stav, perspektivy a výuka. Vysoké učení technické v Brně: nakladatelství VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1601-7.
- [4] DUŠEK, František, HONC, Daniel. Matlab a Simulink: Úvod do používání. Univerzita Pardubice, 2005. ISBN 80-7194-776-8-55-752-05.
- [5] ABB. www.abb.cz [online]. Dostupné z < www.abb.cz >.
- [6] KŮS, Václav. Nízkofrekvenční rušení. Plzeň: tiskové středisko ZČU, 2003. ISBN 80-7082-976-1.