

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Princip a chování základních polovodičových měničů
s vlastní komutací**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin BAROSS**
Osobní číslo: **E12B0498P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Princip a chování základních polovodičových měničů s vlastní komutací**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

Zpracujte podklady pro vybrané typy výkonových měničů pro systém EDUCON.

1. Uveďte základní informace o každém měniči (tj. použití, schéma zapojení silového obvodu, princip činnosti, možnosti řízení, vlastnosti, omezení atd.).
2. Pro každý měnič proveďte numerickou simulaci základního chování pro běžné parametry zdrojů a zátěží. Simulujte též vybrané přechodové děje.
3. Zpracujte obrazový materiál tak, aby bylo možno přehledně sledovat jednotlivé taktly zvoleného měniče jak na silovém obvodu, tak na výsledných průbězích (včetně případného doprovodného textu).
4. Doplňte databázi zkušebních otázek o problematiku zvolených polovodičových měničů. Případně doplňte také seznam použitých symbolů a základních pojmů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 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. Jiří Fořt, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na objasnění problematiky principu a chování základních polovodičových měničů s vlastní komutací. Hlavním úkolem bylo vytvořit simulace vybraných měničů s vlastní komutací, a tím přispět k rozšíření výukového internetového portálu EDUCON. Pro formátování obsahu daných simulací a jejich zobrazování na webových stránkách je použit jazyk HTML (HyperText Markup language) s implementovaným CSS (Cascading Style Sheet). Cílem této bakalářské práce je názorně vysvětlit a pomoci studentům pochopit základní principy výkonových polovodičových měničů.

Klíčová slova

Polovodičový měnič, pulsní měnič, napěťový střídač, dioda, simulace, tranzistor

Abstract

This bachelor thesis is directed aim at the explication of the principle and basic semi-conductor converters behaviour problems with own commutation. Major task was to create simulation of chosen power convertors with own commutation and thereby to prevalence of educational Internet (online) portal EDUCON. In order to format the content of given simulations and their displaying on websites there is used the HTML (HyperText Markup Language) with implemented CSS (Cascading Style Sheet). The target of this bachelor thesis is to clearly demonstrate and help students to comprehend the basic principles of power convertors.

Key words

Semiconductor converter, pulse convertor, voltage inverter, diode, simulation, transistor

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

V Plzni dne 2.6.2016

Jméno příjmení

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 INTERNETOVÝ PORTÁL EDUCON	11
1.1 NÁVRH SYSTÉMU	11
1.2 NÁZEV SYSTÉMU	11
1.3 STRUKTURA SYSTÉMU	11
1.4 ROZHRANÍ PRO WEBOVOU ADMINISTRACI SYSTÉMU	12
2 PRINCIP A CHOVÁNÍ ZÁKLADNÍCH POLOVODIČOVÝCH MĚNIČŮ S VLASTNÍ KOMUTACÍ – TEORETICKÁ ČÁST	13
2.1 VLASTNÍ KOMUTACE	13
2.2 POLOVODIČOVÉ MĚNIČE S VLASTNÍ KOMUTACÍ	14
2.3 PULSNÍ MĚNIČE	14
2.3.1 Pulsní měnič pro snižování napětí	15
2.3.2 Pulsní měnič pro zvyšování napětí	16
2.4 VÍCEKVADRANTOVÁ SPOJENÍ PULSNÍCH MĚNIČŮ	17
2.4.1 Dvoukvadrantový pulsní měnič s reverzací proudu	17
2.4.2 Čtyřkvadrantový pulsní měnič	18
2.5 JEDNOFÁZOVÝ NAPĚŤOVÝ STŘÍDAČ	19
2.6 TŘÍFÁZOVÝ NAPĚŤOVÝ STŘÍDAČ	21
3 POUŽITÝ SOFTWARE A JEHO FUNKCE	24
3.1 MATLAB	24
3.2 SIMULINK	25
3.3 PLECS	25
4 POUŽITÉ PROGRAMOVACÍ JAZYKY	29
4.1 HTML	29
4.2 CSS	30
5 STRUKTURA APLIKACE	31
5.1 STRUKTURA WEBOVÉHO ROZHRANÍ	31
5.1.1 Úvodní strana	31
5.1.2 Simulační okno	33
5.2 ZPRACOVÁNÍ SIMULACÍ	34
6 DATABÁZE ZKUŠEBNÍCH OTÁZEK	40
ZÁVĚR	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	44
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

L	Indukčnost zátěže
R	Odpor zátěže
U_i	Indukované napětí zátěže
U_d	Napětí zátěže
U_{10}, U_{20}, U_{30}	Fázové napětí střídače
$U_{z12}, U_{z23}, U_{z31}$	Sdružené napětí střídače
V_0	Nulová dioda
V	Stejnoseměrný spínač
VR	Zpětná dioda
I_d	Proud procházející zátěží
I_v	Proud procházející spínačem
z	Poměrná doba sepnutí
T	Perioda spínání
T_1	Časový interval sepnutého spínače
T_2	Časový interval vypnutého spínače

Úvod

Cílem této bakalářské práce je objasnit čtenáři problematiku principu a chování základních polovodičových měničů s vlastní komutací. Hlavním úkolem je vytvořit obrazové materiály a simulace vybraných měničů s vlastní komutací, a tím připravit podklady pro rozšíření výukového internetového portálu EDUCON.

Bakalářská práce je rozdělena do několika částí. První část podává informace o internetovém portálu EDUCON, jeho návrhu, koncepci, struktuře a webovém rozhraní. Druhá část charakterizuje základní rozdělení polovodičových měničů, stručně popisuje chování vybraných měničů a jejich využití v praxi. Třetí část přibližuje interaktivní prostředí MATLAB, SIMULINK a PLECS, ve kterých byly vytvořeny simulace daných polovodičových měničů. Čtvrtá část je věnována programovacím jazykům HTML a CSS použitých pro formátování obsahu simulací polovodičových měničů a jejich zobrazování na webových stránkách. Obsahem páté části je vlastní zpracování daných simulací a popis vytvořené uživatelské aplikace webového portálu. V poslední části jsou uvedeny zkušební otázky pro vytvoření databáze testů.

1 Internetový portál EDUCON

1.1 Návrh systému

Systém EDUCON je výukový portál, který byl vytvořen za účelem předání nejzákladnějších informací z oboru výkonové elektrotechniky. EDUCON má být dostupný pro všechny studenty, a proto byl vytvořen jako internetový portál. [4]

Výukový systém je navržen takovým způsobem, aby mohl být snadno rozšiřitelný a modifikovatelný jeho obsah nebo jeho struktura. Modifikace obsahu je možná se základní znalostí programování. [4]

Systém je nezávislý na platformě, v tomto případě na typu internetového prohlížeče. Výhodou je možnost přenosu na jiný server nebo do off-line verze.[4]

1.2 Název systému

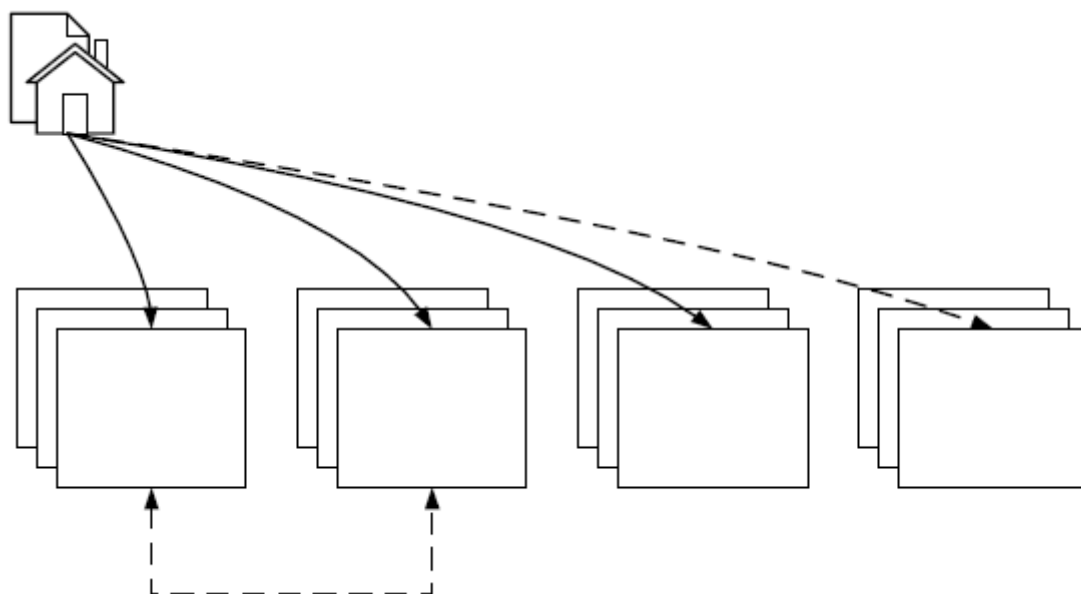
Název EDUCON byl odvozen z anglických slov EDUcation (výuka) a CONverters (měniče). Tento název vystihuje funkci internetového portálu – podpora výuky principů a chování polovodičových měničů. Logo systému EDUCON je znázorněno na obrázku 1. [4]



Obrázek 1: Logo systému [4]

1.3 Struktura systému

Systém se dělí na tzv. moduly. Tyto moduly mají funkci hlavní – výukové moduly, nebo funkci podpůrnou – doplňkové a ostatní moduly. Výukové moduly zahrnují hlavní část obsahu, kterým je výukový text k základním polovodičovým měničům a obrazový materiál. Doplňkové moduly jsou různé přehledy polovodičových součástek nebo popis základních pojmů z výkonové elektroniky. Doplňkové a výukové moduly jsou propojeny pomocí hypertextových odkazů. Názorné schéma rozdělení je na obrázku 2. [4]



Obrázek 2: Základní členění modulů [4]

Do systému lze vstupovat přes dvě rozhraní - základní uživatelské rozhraní sloužící pro výuku a rozhraní pro webovou administraci určené správci systému. [4]

1.4 Rozhraní pro webovou administraci systému

Rozhraní pro webovou administraci obsahuje několik nástrojů zobrazených na obrázku 3, s jejichž pomocí je možné spravovat systém pouze pomocí webového prohlížeče. Přístup do tohoto rozhraní nalezneme na adrese <http://educon.zcu.cz/admin.html>, kde se objeví vstupní formulář s uživatelským jménem a heslem. [4]

E D U C O N - webová administrace systému

Uživatel: **mbaross**

[Editace modulů](#) [Download souborů](#) [Úprava weblinků](#) [Logout](#)

Obrázek 3: Hlavní panel nástrojů v rozhraní pro webovou administraci

Pod odkazem „Editace modulů“ je možné přidávat, mazat nebo editovat veškeré moduly v systému. V těle modulu lze použít většinu běžných tagů. Vnitřní identifikace modulu je realizována pomocí volacího linku, který je vytvořen z data doplněného modulu a pořadového čísla. Dále se zobrazuje, kdo a kdy modul vydal, jak vidíme na obrázku 4. [4]

[Přidat nový modul](#) - [Správa souvisejících modulů](#)

od do třídít dle - Celkem modulů: 8

vyhledat text v

Zobrazit pouze mé moduly

Link	Titulek	Datum vydání / Vydáno	Autor modulu	Akce	Smaž čl.
2005022501	Výkonové polovodičové součástky	25.02.2005 23:46:54 / Ano	admin	Edituj / Preview	<input type="checkbox"/>
2005022209	On-line simulace	22.02.2005 13:07:04 / Ano	admin	Edituj / Preview	<input type="checkbox"/>
2005022208	Značky ve výkonové elektronice	22.02.2005 02:03:33 / Ano	admin	Edituj / Preview	<input type="checkbox"/>
2005022207	Základní pojmy ve výkonové elektronice	22.02.2005 02:02:52 / Ano	admin	Edituj / Preview	<input type="checkbox"/>
2005022206	Test základních znalostí z výkonové elektroniky	22.02.2005 02:02:18 / Ano	admin	Edituj / Preview	<input type="checkbox"/>
2005022204	Trojfázový můstkový usměrňovač	22.02.2005 02:01:06 / Ano	admin	Edituj / Preview	<input type="checkbox"/>
2005022203	Trojfázový napěťový střídač	22.02.2005 02:00:07 / Ano	admin	Edituj / Preview	<input type="checkbox"/>
2005022202	Snižovací pulsní měnič	22.02.2005 01:59:52 / Ano	admin	Edituj / Preview	<input type="checkbox"/>

Obrázek 4: Správa modulů [4]

2 Princip a chování základních polovodičových měničů s vlastní komutací – teoretická část

Měniče jsou v elektrotechnice zařízení, která slouží ke změně parametrů elektrické energie. Základními parametry elektrické energie jsou velikost elektrického napětí, proudu a u střídavých napájecích systémů také frekvence. Nejčastějšími typy měničů jsou polovodiče, v praxi především polovodiče měničů napětí a frekvence. Další pozornost bude věnována především polovodičovým měničům s vlastní komutací. [1]

2.1 Vlastní komutace

Komutace je elektromagnetický děj probíhající v obvodu měniče, při kterém dochází k přechodu proudu (tekoucího uzlem) z jedné větve do druhé, aniž by došlo k jeho přerušení.

U vlastní komutace je zdroj komutačního napětí umístěný ve vlastním obvodu měniče. V praxi se lze setkat také s termínem nucená komutace. [6]

2.2 Polovodičové měniče s vlastní komutací

Existuje spousta měničů s vlastní komutací, např.:

Pulsní měniče

Napětíové střídače

Proudové střídače

Rezonanční měniče

Usměrňovače s vlastní komutací

Přímé měniče kmitočtu

Nepřímé měniče kmitočtu

Zde jsou uvedeny základní skupiny měničů s vlastní komutací. Tyto skupiny obsahují konkrétní typy měničů, které se mohou dále vzájemně kombinovat. Např. dvoukvadrantový pulsní měnič s reverzací proudu vznikne kombinací pulsního měniče pro snižování napětí a pulsního měniče pro zvyšování napětí. V této bakalářské práci se po dohodě s Ing. Jířím Fořtem, Ph.D. zabývám pouze vybranými typy polovodičových měničů. [1]

2.3 Pulsní měniče

Pulsní měniče jsou zařízení, která se používají pro snižování napětí, zvyšování napětí, snižování i zvyšování napětí nebo pulsní řízení odporu (rezistoru). V každém pulsním měniči je použit periodicky spínaný polovodičový spínač (např. IGBT tranzistor), který má oproti mechanickému spínači tu výhodu, že je bezkontaktní, a proto může dosáhnout mnohem

vyšších spínacích kmitočtů. Největší uplatnění pulsních měničů je v elektrické trakci (trolejbusy, lokomotivy, elektromobily). [1]

2.3.1 Pulsní měnič pro snižování napětí

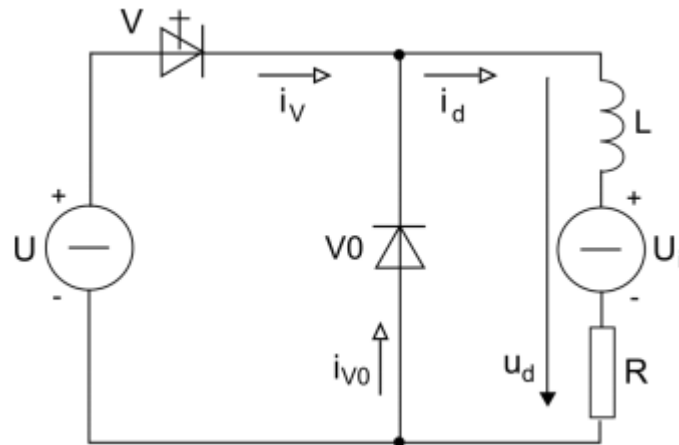
Schéma pulsního měniče pro snižování napětí je na obrázku 5. Obvod je tvořen spínačem V, nulovou diodou V0 a zátěží, která je složena z R, L, U_i prvků. Při sepnutí spínače V, v intervalu T₁, je na zátěži stejné napětí jako napětí napájecího zdroje (U=U_d). Hodnota proudu zátěže je stejná jako hodnota proudu spínače (i_d=i_v) a exponenciálně narůstá. V intervalu T₂ je spínač V vypnut. To způsobuje, že napětí na zátěži klesne na nulovou hodnotu, proud je uzavřen přes nulovou diodu a exponenciálně klesá. V případě, že proud v intervalu T₂ nestihne klesnout k nule, jedná se o nepřerušovaný proud. [1]

Výpočet střední hodnoty napětí na zátěži lze stanovit ze vztahu: [3]

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_1} U dt = \frac{T_1}{T} U = z \cdot U \quad (3.1)$$

Hodnota řízení z je dána vstupním signálem do vypínače V a je možné řídit z v intervalu $0 \leq z \leq 1$. Regulační rozsah napětí je pak $0 \leq U_d \leq U$. [2]

Výkon se přenáší pouze ze zdroje U do zátěže Z. Při sepnutém spínači je energie ze zdroje přijímána zátěží. Část této energie se ztrácí na R, část se akumuluje na L a zbytek přijímá zdroj U_i. Při vypnutí spínače se uvolňuje nahromaděná energie na L a je částečně přijímána zdrojem U_i. Zbytek energie se ztrácí na odporu R. [2]



Obrázek 5: Schéma pulsního měniče pro snižování napětí [2]

2.3.2 Pulsní měnič pro zvyšování napětí

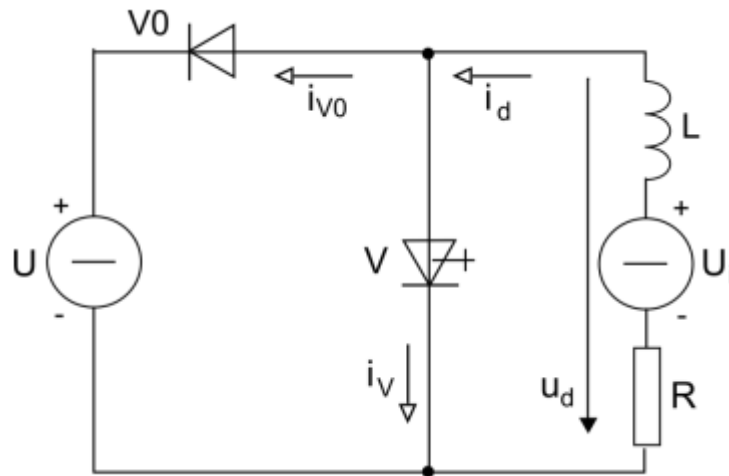
Schéma pulsního měniče pro zvyšování napětí znázorňuje obrázek 6. Obvod je tvořen spínačem V, nulovou diodou V0 a R, L, U_i zátěží. Při sepnutí spínače brání nulová dioda zkratu zdroje, ale zátěž je ve zkratu. Napětí na zátěži je nulové, ale proud exponenciálně narůstá. Část odčerpávané energie se akumuluje na indukčnosti L a část se ztrácí na odporu R. Když dojde k vypnutí spínače, nedojde k přerušení proudu, ale vlivem L pokračuje přes nulovou diodu do zdroje. V intervalu vypnutí T_2 proud exponenciálně klesá k nule. Pokud proud v intervalu T_2 nestačí klesnout na nulovou hodnotu, je nepřerušovaný. V případě, že se jedná o nepřerušovaný proud, platí v intervalu T_2 rovnost $u_d=U$. V tomto intervalu je energie odčerpávána indukčností L a zdrojem U_i . Odčerpaná energie se následně částečně ztrácí na odporu R a zbytek je posílán do zdroje U. [2]

Výpočet střední hodnoty napětí na zátěži lze stanovit ze vztahu: [3]

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_2} U dt = U \cdot \frac{T_2}{T} \quad (3.2)$$

Pulsní měnič pro zvyšování napětí se používá v případech, kdy je nutné převádět energii z nízkonapěťového zdroje do vysokonapěťového zdroje. Příkladem může být generátorické brzdění stejnosměrného motoru. Při chodu motoru v motorickém režimu je motor napájen ze zdroje. V případě režimu brzdění je napětí kotvy v porovnání s napětím zdroje menší

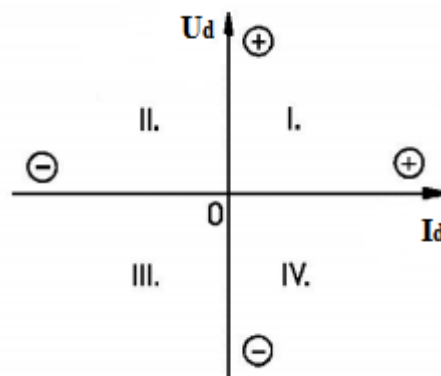
a dochází k rekuperaci energie do zdroje. Pulsní měnič zvyšující napětí je označován také jako rekuperační měnič. [2]



Obrázek 6: Schéma pulsního měniče pro zvyšování napětí [2]

2.4 Vícekvadrantová spojení pulsních měničů

Pulsní měniče je možné rozdělit na jednokvadrantové a vícekvadrantové. Proud I_d a napětí zátěže U_d určují pracovní bod, který se může pohybovat pouze v jednom kvadrantu roviny s osami U_d a I_d . Při kombinaci více spínačů je možné sestavit vícekvadrantové pulsní měniče. Jednotlivé kvadranty provozní oblasti jsou zobrazeny na obrázku 7. [1]

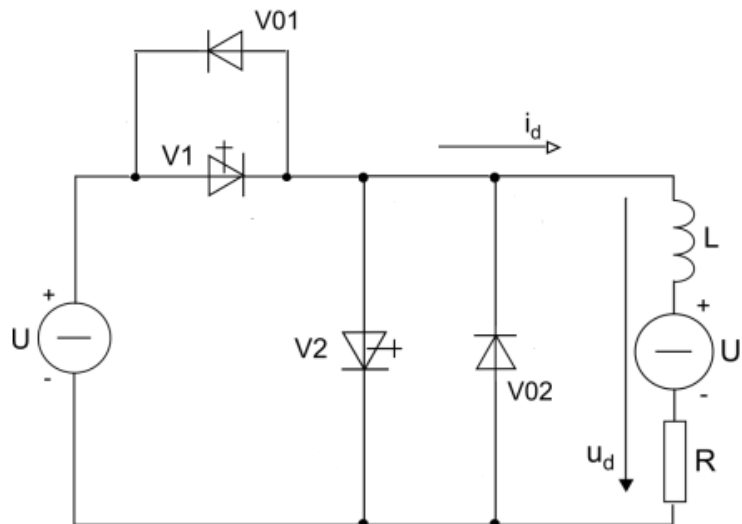


Obrázek 7: Kvadranty provozní oblasti v souřadném systému I_d , U_d [1]

2.4.1 Dvoukvadrantový pulsní měnič s reverzací proudu

Dvoukvadrantové spojení pulsního měniče s reverzací proudu zachycuje schéma na obrázku 8. Dvoukvadrantový pulsní měnič je zapojen v kombinaci měniče pro snižování napětí a měniče pro zvyšování napětí. Díky tomu zapojení je možný provoz pracovního bodu

v I. a II. kvadrantu provozní oblasti, která je znázorněna na obrázku 7. Dvoukvadrantový pulsní měnič je složen ze dvou spínačů V1 a V2, dále jsou zde dvě nulové diody V01 a V02, zdroj a zátěž. V I. kvadrantu je spínán spínač V1 a nulová dioda V02. Dvoukvadrantový pulsní měnič se chová jako měnič pro snižování napětí a dodává energii ze zdroje do zátěže. Ve II. kvadrantu je sepnut spínač V2 a nulová dioda V01. Zde pracuje jako měnič pro zvyšování napětí a dodává energii ze zátěže do zdroje. [1]

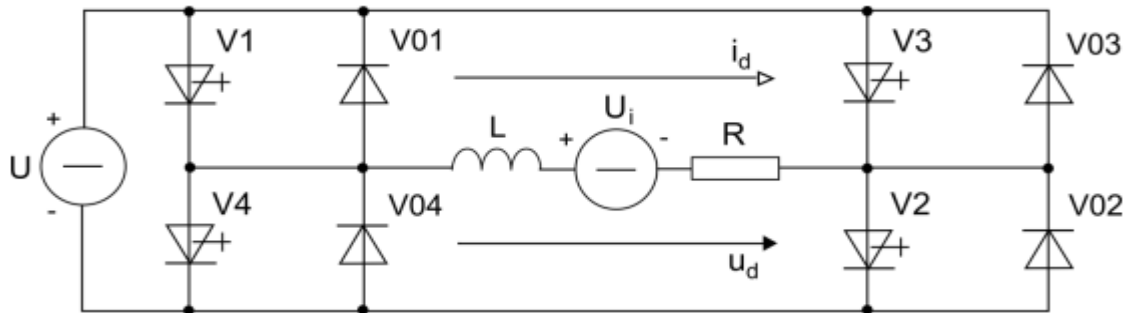


Obrázek 8: Schéma dvoukvadrantového spojení pulsního měniče s reverzací proudu [1]

2.4.2 Čtyřkvadrantový pulsní měnič

Schéma čtyřkvadrantového pulsního měniče je na obrázku 9. Skládá se ze zdroje napětí U , zátěže, spínačů V1-V4, ke kterým jsou antiparalelně připojeny diody V01-V04. V tomto spojení může měnič pracovat ve všech čtyřech kvadrantech provozní oblasti, která je znázorněna na obrázku 7. Při práci spíná každá dvojice diod nebo každá dvojice spínačů v každém kvadrantu. [1]

Existují dva základní způsoby, jak je možné řídit čtyřkvadrantový pulsní měnič, unipolární nebo bipolární. Při bipolárním řízení je na zátěž přiváděno kladné i záporné napětí. Nevýhoda je, že zvlnění proudu na zátěži je dvojnásobné. Naopak při unipolárním řízení je použito napětí jen jedné polarity.[1]



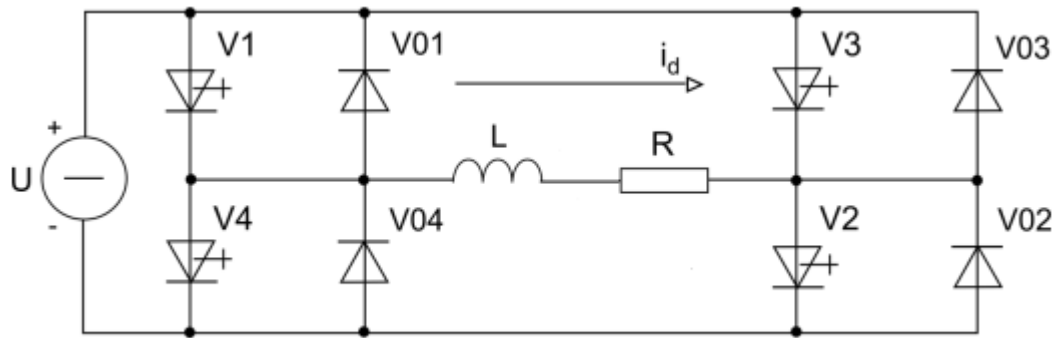
Obrázek 9: Čtyřkvadrantový pulsní měnič [1]

2.5 Jednofázový napěťový střídač

Schéma jednofázového napěťového střídače je znázorněno na obrázku 10. Obvod je tvořen zdrojem napětí, R, L zátěží a antiparalelním spojením diod a tyristorů. Zátěž může být čistě odporová nebo může obsahovat odpor a indukčnost. [5]

V případě, že se jedná o čistě odporovou zátěž, začne při sepnutí spínačů V1 a V2 protékat zátěží kladný proud i_z . Při vypnutí spínačů V1 a V2 následuje zapnutí spínačů V3 a V4, jenž má za následek, že se polarita proudu i_z změní. Elektrický proud má obdélníkový průběh o délce π , pokud není zkrácen interval. Velikost proudu a napětí se dá řídit délkou sepnutí a vypnutí jednotlivých dvojic spínačů, kterou určuje úhel sepnutí ψ . Při čistě odporové zátěži prochází proud pouze spínači. [5]

Při induktivně-odporové zátěži může být několik způsobů spínání, ale výsledkem musí být střídání kladného a záporného napětí na zátěži. Toho lze docílit spínáním dvojice spínačů V1, V2 a dvojice spínačů V3 a V4. Při sepnutí spínačů V1 a V2 se objeví na zátěži kladné napětí zdroje $U=U_d$. Jelikož zátěž obsahuje indukčnost, hodnota napětí se mění skokově a hodnota proudu spojitě. Proto bude hodnota proudu v prvním taktu exponenciálně narůstat. Ve druhé polovině periody dojde ke spínání spínačů V3 a V4. Proud, který protékal zátěží, se nyní začne uzavírat přes diody V03 a V04 do té doby, než klesne hodnota na nulu. Až v této době začne proud procházet spínači V3 a V4 a exponenciálně klesá. Hodnota napětí v druhém taktu se skokově změnila na $U=-U_d$. [5]



Obrázek 10: Jednofázový střídač napětí [3]

Výstupní napětí střídače lze řídit několika způsoby, jak je možné vidět na obrázku 11.

Obdélníkové amplitudové řízení

Obdélníkové šířkové řízení

Šířkové pulsní řízení

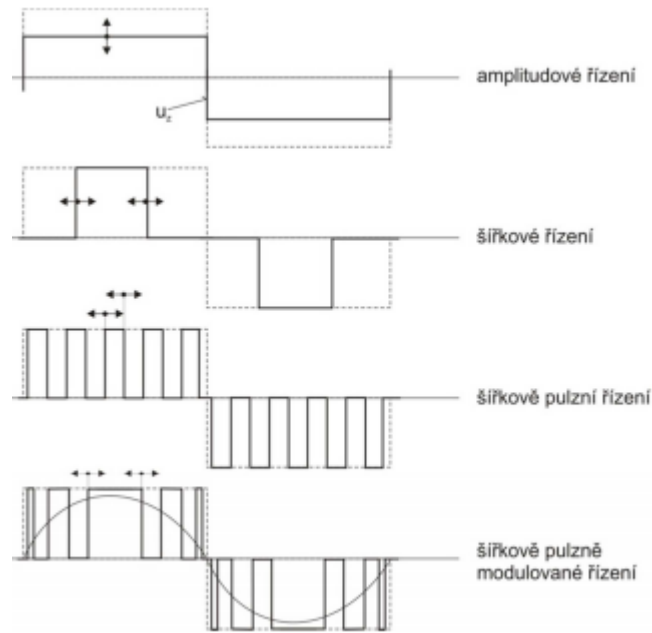
Šířkově pulsně modulované řízení

Při amplitudovém řízení lze řídit velikost amplitudy díky tomu, že vstupní napětí je přímo úměrné výstupnímu napětí. Pokud je použit jako napájecí zdroj řízený usměrňovač, může být použit k řízení amplitudy na výstupu. Vzhledem k tomu, že většina aplikací pracuje s konstantním napětím, tak se tento způsob moc nepoužívá. [5]

U šířkového řízení je využita změna doby vedení jednotlivých spínačů, což má za následek změnu efektivní hodnoty výstupního napětí. Šířkové řízení se používá u jednofázových střídačů, např. při indukčním ohřevu vody. [5]

Šířkově pulsní řízení vychází z toho, že za jednu púlperodu výstupního napětí dojde k několikanásobnému sepnutí a vypnutí spínačů v jednotlivých větvích napětového střídače. [5]

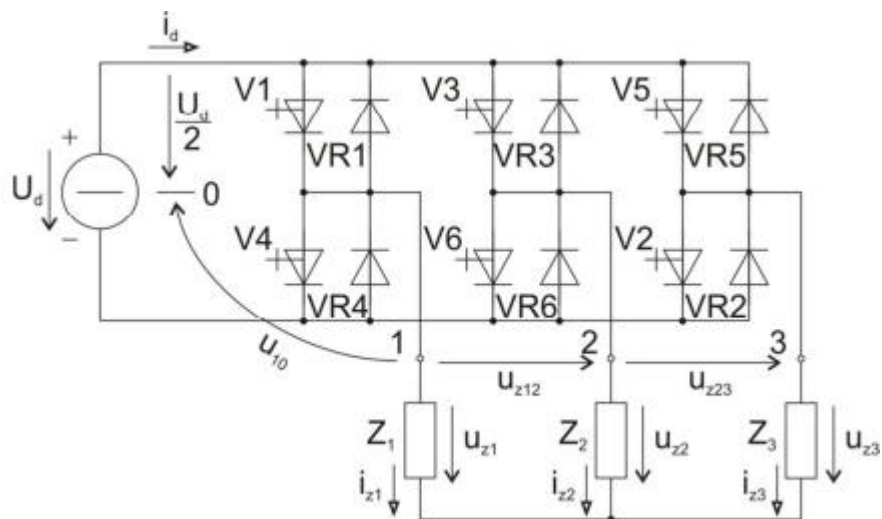
Šířkově pulsně modulované řízení vychází z šířkového pulsního řízení s tím rozdílem, že šířka pulzů je proměnná. [5]



Obrázek 111: Způsob řízení výstupního napětí střídače [3]

2.6 Třífázový napěťový střídač

Schéma zapojení třífázového napěťového střídače vidíme na obrázku 12. Obvod se skládá ze zdroje napětí U , zátěže, šesti spínačů $V1-V6$, ke kterým je připojeno 6 zpětných diod $VR1-VR6$ antiparalelně. Zátěž může být zapojena do hvězdy nebo trojúhelníku. Třífázový napěťový střídač umožňuje, aby proud I_d protékal v obou směrech. Při průchodu kladného proudu teče proud spínačem V a jedná se o střídačový chod. V případě, že se jedná o záporný proud, je veden přes zpětné diody VR a jedná se o usměrňovací chod.[1]



Obrázek 12: Třífázový střídač napětí [1]

Napětí na výstupu střídače na svorkách 1, 2, 3 vztažené k pomyslnému vývodu 0 stejnosměrného zdroje je označeno na obrázku 11 jako u_{10} (u_{20} , u_{30}). Toto napětí se nazývá fázové napětí střídače, které ale není shodné s napětím na zátěži. Napětí u_{10} nabývá hodnot od $-\frac{U_d}{2}$ do $\frac{U_d}{2}$. V případě, že je sepnut V1 (VR1), hodnota napětí u_{10} je $\frac{U_d}{2}$. Při sepnutí V4 (VR4) má napětí u_{10} hodnotu $-\frac{U_d}{2}$. Stejným způsobem to platí i pro zbylá napětí u_{20} a u_{30} . [1]

Podle fázových napětí střídače je možné stanovit velikost sdruženého napětí: [1]

$$u_{z12} = u_{10} - u_{20} \quad (3.3)$$

$$u_{z23} = u_{20} - u_{30} \quad (3.4)$$

$$u_{z31} = u_{30} - u_{10} \quad (3.5)$$

Pro zátěž, která je zapojená do trojúhelníku, platí, že velikost sdruženého napětí je stejná jako velikost fázového napětí. Vztah mezi sdruženým a fázovým napětím u zátěže zapojené do hvězdy lze popsat vztahy: [1]

$$u_{z12} = u_{z1} - u_{z2} \quad (3.6)$$

$$u_{z23} = u_{z2} - u_{z3} \quad (3.7)$$

$$u_{z31} = u_{z3} - u_{z1} \quad (3.8)$$

V případě, že střídač obsahuje ideálně symetrickou zátěž, platí pro fázová napětí tyto rovnice:

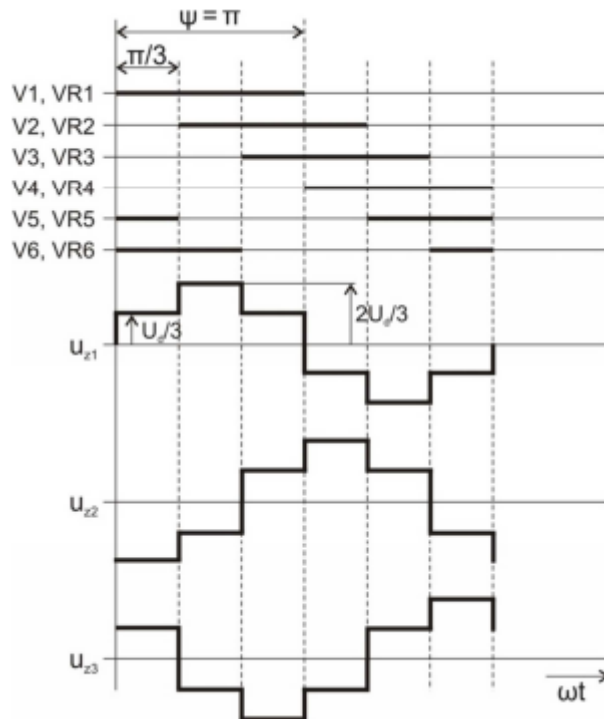
$$u_1 + u_2 + u_3 = 0 \quad (3.9)$$

$$u_{z1} = \frac{1}{3} (u_{z12} - u_{z31}) \quad (3.10)$$

$$u_{z2} = \frac{1}{3} (u_{z23} - u_{z12}) \quad (3.11)$$

$$u_{z3} = \frac{1}{3} (u_{z31} - u_{z23}) \quad (3.12)$$

Průběhy napětí zátěže střídače a úhel řízení ψ spínacích prvků jsou zobrazeny na obrázku 13. V horní části obrázku je znázorněno spínání jednotlivých spínačů. Neuvažuje se zde s mrtvým časem (časový interval mezi zapnutím a vypnutím spínačů jedné větve střídače, a tak je zabráněno zkratu zdroje). [1]



Obrázek 13: Průběhy fázových napětí [1]

Hodnota úhlu řízení ψ je omezená. Na obrázku 12 je vidět, že pokud je $\psi > \pi$, dojde k překrytí spínačů v jedné větvi. Při sepnutí dvojice spínačů v jedné větvi (např. V1 a V4) by došlo ke zkratu. Pokud se má ve střídači uzavírat proud, musí být spuštěn alespoň jeden katodový (V1, V3 a V5) a jeden anodový spínač (V2, V4 a V6). Z obrázku 12 je tedy zřejmé, že překrytí anodové i katodové součástky zároveň je možné pouze pro hodnoty $\psi > \frac{\pi}{3}$. [1]

Výstupní napětí střídače lze řídit několika způsoby:

Obdélníkové amplitudové řízení

Obdélníkové šířkové řízení

Šířkové pulsní řízení

Šířkově pulsně modulované řízení (viz. kapitola 2.5)

3 Použitý software a jeho funkce

Pro drobné úpravy byl použit program Malování (standartní doplněk od Microsoftu), který zde není uveden.

3.1 MATLAB

Systém MATLAB (MATrix LABoratory = maticová laboratoř) byl vyvinut v roce 1984 firmou The MathWorks, Inc. MATLAB je výkonné interaktivní prostředí, v němž jsou spojeny technické výpočty, vizualizace dat a programovací jazyk. MATLAB se využívá především pro matematické a vědecké výpočty, modelování, simulování, analýzu dat, měření a zpracování dat, vývoj algoritmů a návrhy řídicích a komunikačních systémů. [8]

Jednotlivé úkony se provádí napsáním příkazu do příkazové řádky, poté je příkaz ihned proveden. Při potřebě napsání většího množství příkazů je možné vytvořit skript. Ten spustí všechny požadované příkazy po vypsání jména scriptu na příkazový řádek. MATLAB obsahuje tzv. m-funkce. Ve skutečnosti to jsou textové soubory uložených příkazů a funkcí. Příkazy lze libovolně rozšiřovat, a tak si uživatel může vytvářet své vlastní m-funkce. [8]

Do systému lze nahrát mnoho dalších rozšiřujících knihoven, jinak nazývaných Toolboxů, které jsou orientovány na určité vědní a technické obory. Mohou být použity pro zpracování signálů a obrazů, pro práci s neuronovými sítěmi, návrhy filtrů nebo pro finance a ekonomiku aj. [8]

3.2 Simulink

Simulink je rozšiřující nadstavba MATLABU, jenž umožňuje elektrotechnikům rychle a přesně sestavit počítačový model dynamického systému použitím blokového schématu. Použitím Simulinku je snadné vytvořit komplexní nelineární systémy. Modely pak mohou zobrazit grafické animace, díky kterým je možné vidět průběhy simulací, což významně posiluje porozumění chování daného systému. [7]

V knihovně Simulink jsem nejvíce pracoval s bloky Mux (multiplexor), Pulse generator a Sin Wave.

Multiplexor

Multiplexor umožňuje převod několika vstupních signálů na jeden výstupní vektorový signál. Vhodné použití je například u osciloskopu, kdy je možné všechny signály soustředit do jediného. V osciloskopu je pak snadná orientace a lze snadno porovnat jednotlivé signály.

Pulse generator

Pulse generator vytváří obdélníkový signál. Pro tento signál jdou nastavit požadované parametry. Je možné nastavit velikost amplitudy, velikost frekvence, šířku impulsu a zpoždění signálu. Zpožděním signálu je možné měnit velikost řídicího úhlu ψ .

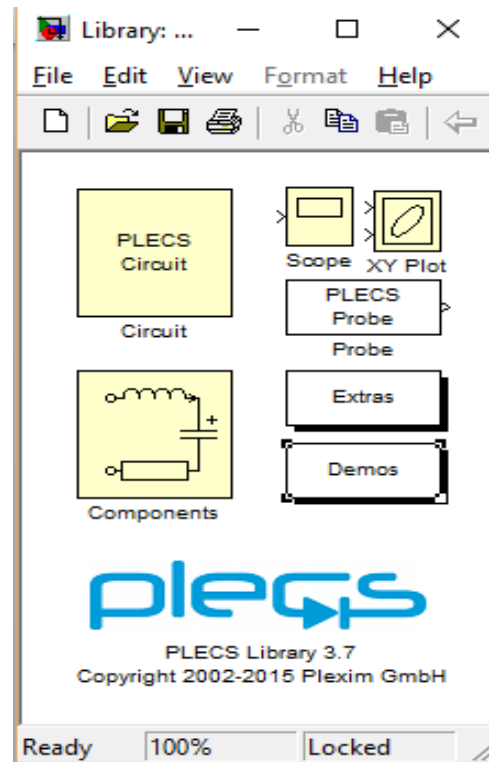
Sin Wave

Sin wave blok vytváří sinusový signál. Po otevření bloku lze nastavit různé parametry sinusového průběhu. Je možné nastavit hodnotu amplitudy, posunutí vzhledem k ose x , velikost frekvence, fáze a vzorkování času.

3.3 Plecs

Plecs je doplněk Simulinku od firmy Plexim, jejíž nástroje mohou být aplikovány v mnoha odvětvích výkonové elektroniky. Plecs umožňuje modelování a simulace kompletních systémů včetně energetických zdrojů, výkonových měničů a zatížení. Součástí Plecsu je knihovna zahrnující elektrické, magnetické a tepelné odvětví. [9]

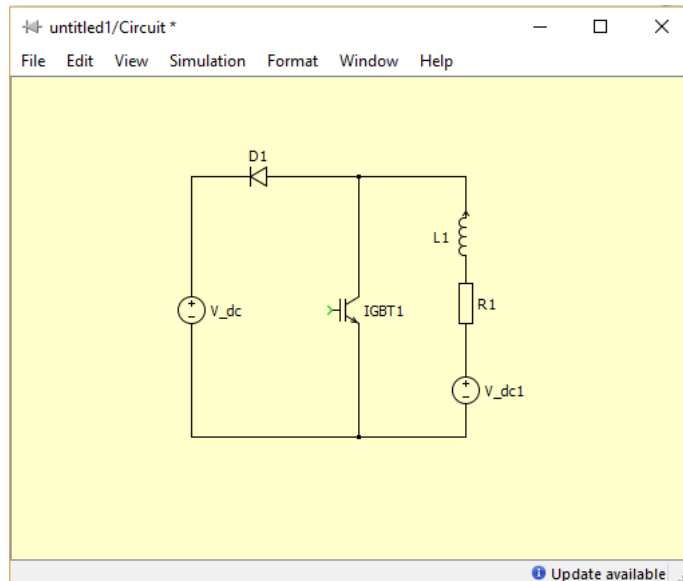
Po zadání příkazu „plecslib“ do příkazového řádku v programu MATLAB se otevře knihovna Plesc zobrazená na obrázku 14. V knihovně Plescu jsem používal bloky circuit, components a scope. Kliknutím na tlačítko „new model“ dojde k otevření nového okna, na které se mohou přesouvat jednotlivé bloky z knihovny a s nimiž lze dále pracovat.



Obrázek 14: Knihovna Plesc

Circuit

Blok circuit umožňuje přehledné propojení Plescu a Simulinku. Po otevření tohoto bloku se otevře samostatné okno, do kterého je možné umisťovat jednotlivé součástky z bloku components a sestavit tak z nich daný silový obvod polovodičového měniče (obrázek 15).

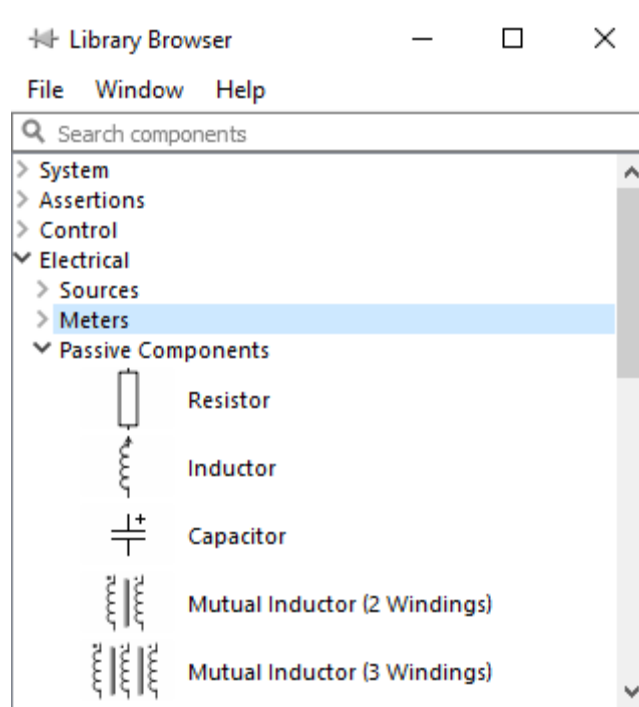


Obrázek 15: Ukázka spojování součástek v bloku circuit

Components

Tento blok obsahuje základní elektrotechnické prvky, např.: zdroj, rezistor, tranzistor, ampérmetr, kapacitor, označení vstupních a výstupních veličin, atd. Tento panel s jednotlivými prvky je zobrazen na obrázku 16.

Celá simulace je tedy založená na správném propojení těchto prvků, správném nastavení jejich parametrů a určení počtu vstupních a výstupních veličin.

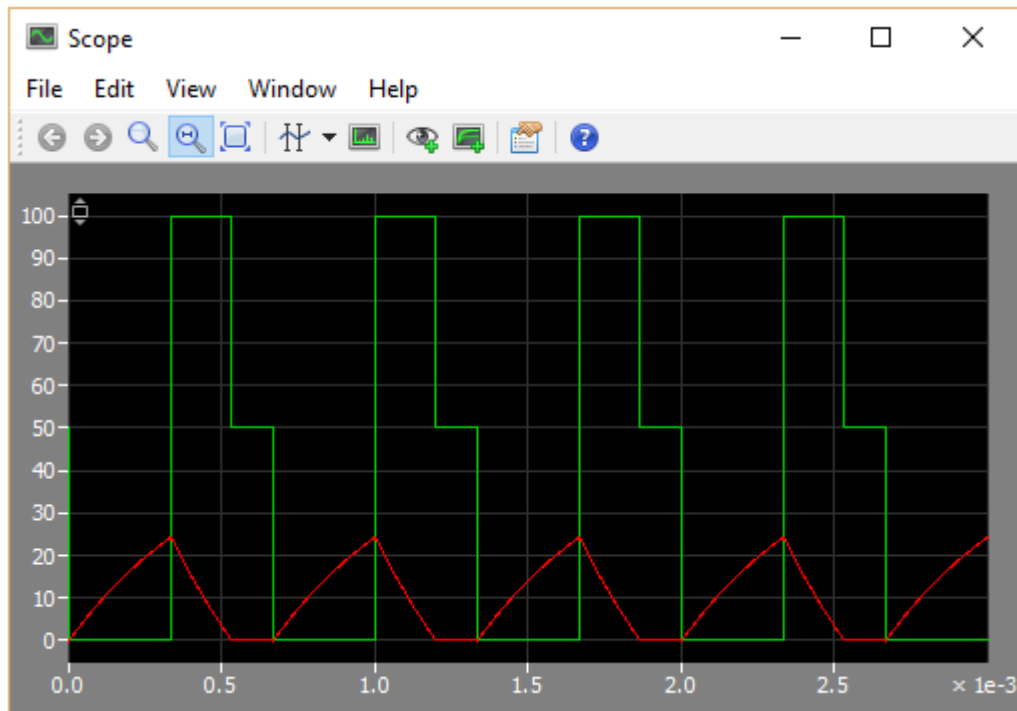


Obrázek 16: Panel elektrotechnických prvků

Scope

Osciloskop je možné použít ze Simulinku nebo také z Plecsu. Já jsem pracoval s Plecs verzí, protože je přehlednější a nabízí více možností.

Osciloskop dokáže zobrazovat požadované veličiny. V hlavní liště je řada příkazů, kterými je možné dále graf upravovat. Mezi základní funkce osciloskopu patří zoom v horizontálním nebo vertikálním směru, zobrazení několika průběhů požadovaných veličin v jednom grafu, ukládání výsledných grafů, tisk, aj. Grafické úpravy, jako změna barvy čar, změna tloušťky čar nebo popisování os, v nastavení Simulink - osciloskopu nejsou. Tyto úpravy je nutné provádět v Matlabu přes funkci „plot“. Tato funkce umožňuje grafický výstup hodnot ve formě 2D grafu. Tento postup je zdlouhavý, neboť se musí nastavovat ručně všechny požadované parametry, ale je velmi přesný. Mnohem jednodušší je práce v Plecs – osciloskopu. V tomto osciloskopu lze nastavit všechny potřebné grafické úpravy. Vzhled okna osciloskopu vidíme na obrázku 17.



Obrázek 17: Okno osciloskopu

4 Použité programovací jazyky

4.1 HTML

HTML (HyperText Markup Language – hypertextový značkovací jazyk) je jazyk, pomocí něhož je možné vytvářet webové stránky. Jeho základní funkcí je provazování dokumentů v síti. Jednotlivé texty na internetu jsou propojeny mnoha odkazy, a tak je možné přecházet z jedné stránky na druhou, od jednoho dokumentu k druhému. K práci s jednotlivými elementy webového dokumentu jsou použity značky – od toho „značkovací“ jazyk. [10]

HTML je interpretovaný jazyk, což znamená, že je psán přímo ve zdrojovém kódu. Některé části webové stránky, jako jsou třeba obrázky, které se musí překládat do strojového kódu, nejsou umístěny v HTML dokumentu, ale pouze se na ně odkazuje z těla textu. [10]

Oficiální a aktuálně platnou verzi jazyka HTML vytváří organizace W3C. Tato organizace definuje povolené značky a pravidla HTML. Dodržování standardů je základem interpretace HTML ve webových prohlížečích. [10]

Samotný projekt WWW (World Wide Web) byl zahájen v roce 1989 ve švýcarských laboratořích společnosti CERN, kde Tim Berners-Lee navrhl vytvoření distribuovaného hypertextového systému. První neformální specifikace HTML kódu byla dostupná v r. 1991. Jazyk HTML byl od té doby vyvíjen, než dostal podobu, která se používá dnes (HTML 4.01). [10]

4.2 CSS

CSS (Cascading Style Sheeds), nebo-li kaskádové styly, definují celkovou i jednotlivou grafickou podobu dokumentu HTML. Interpretace HTML značek závisí na prohlížeči. Proto je výhodné použít CSS, jež umožňují nadefinovat všem značkám požadované vlastnosti. Jako tvůrci webových stránek tak můžeme vytvářet vlastní vzhled a definovat chování všech elementů HTML. Jakémukoli elementu se přiřazovat neomezený počet stylů. [10]

Programovací jazyk CSS se od HTML téměř neliší, používá však modernější prostředky. Pomocí CSS lze snáze implementovat finální design webové stránky. Hlavním přínosem stylů je především oddělení struktury a obsahu HTML dokumentu od jeho vzhledu. Velkou výhodou oproti HTML je, že prováděn změna vzhledu a celkové podoby webových stránek je pohodlná a rychlá. V konečném důsledku vytváření webu pomocí CSS ulehčuje a zpřehledňuje zdrojový kód, což má vliv i na celkový objem stránek, který se tím výrazně zmenší. [10]

Stejně jako v případě HTML definuje všechny oficiální specifikace tohoto jazyka organizace W3C. Kaskádové styly byly vytvořeny v roce 1996 (CSS level 1). Kaskádní styly prošly také řadou změn. Dnes se používá verze CSS level 4. [10]

5 Struktura aplikace

5.1 Struktura webového rozhraní

Internetový portál EDUCON je navržen jako výukový zdroj informací, který je možné aktualizovat nebo doplňovat přes administrátorské webové rozhraní. Hlavním úkolem této práce bylo vytvořit on-line simulace vybraných polovodičových měničů s vnitřní komutací, a tím vytvořit podklady pro rozšíření webového portálu v modulu „Výkonová elektronika.“ Vzhledem k tomu, že jsem měl právo vstupu do tohoto systému pouze jako „autor,“ mohl jsem moduly pouze editovat. Vkládat moduly má administrátor webového rozhraní.

5.1.1 Úvodní strana

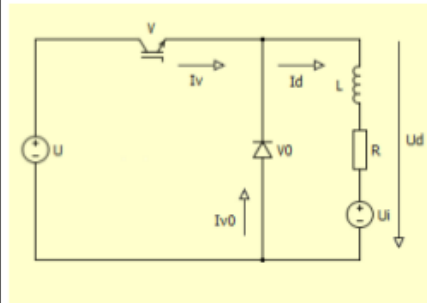
Úvodní strana podává uživateli primární informace o daném polovodičovém měniči s obecnou zátěží (obrázek 18).

Strana je rozdělena na několik částí:

- Název
- Schéma silového obvodu
- Základní informace a princip činnosti daného polovodičového měniče
- Odkaz na simulační okno

Snižovací pulsní měnič

Schéma silového obvodu:



- Pulsní měnič tvoří vypínatelná polovodičová součástka V (jakýkoliv výkonový tranzistor nebo vypínatelný tyristor) a nulová dioda V0
- Spojení slouží k řízení střední hodnoty napětí na zátěži na hodnotu menší než je napětí napájecího zdroje U
- Je uvažována obecná zátěž R- L- Ui (měnič může pracovat také s R-L nebo s R zátěží)

Princip činnosti:

Při sepnutém polovodičovém spínači V:

- je na zátěži napětí $u_d = U$
- proud zátěže se uzavírá přes spínač ($i_d = i_v$)
- křivku proudu tvoří část exponenciály narůstající k hodnotě $(U - U_i) / R$
- přijímá zátěž energii ze zdroje. Část se jí akumuluje v L, část přijímá zdroj U_i a část se ztrácí na R.

Při vypnutém spínači V:

- je na zátěži napětí $u_d = 0$
- křivka proudu je exponenciála klesající k hodnotě $-U_i / R$
- nestačí-li proud i_d v intervalu vypnutí klesnout k nule, je nepřerušovaný
- se energie nahromaděná v předchozím intervalu na L uvolňuje. Část uvolněné energie přijímá U_i a zbytek se ztrácí na R.

U snižovacího pulsního měniče je možno výkon přenášet pouze ze zdroje do zátěže.

Střední hodnota napětí na zátěži při nepřerušovaném proudu je:

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

U_{di} ... ideální střední hodnota napětí na zátěži

z ... poměrná doba sepnutí ($0 \leq z \leq 1$) (T_1 - doba sepnutí prvku V, T - perioda PWM)

Střední hodnota proudu zátěže v ustáleném stavu:

$$I_d = (U_d - U_i) / R$$

Uvažujeme, že v ustáleném stavu je střední hodnota napětí na L nulová.

Simulace:

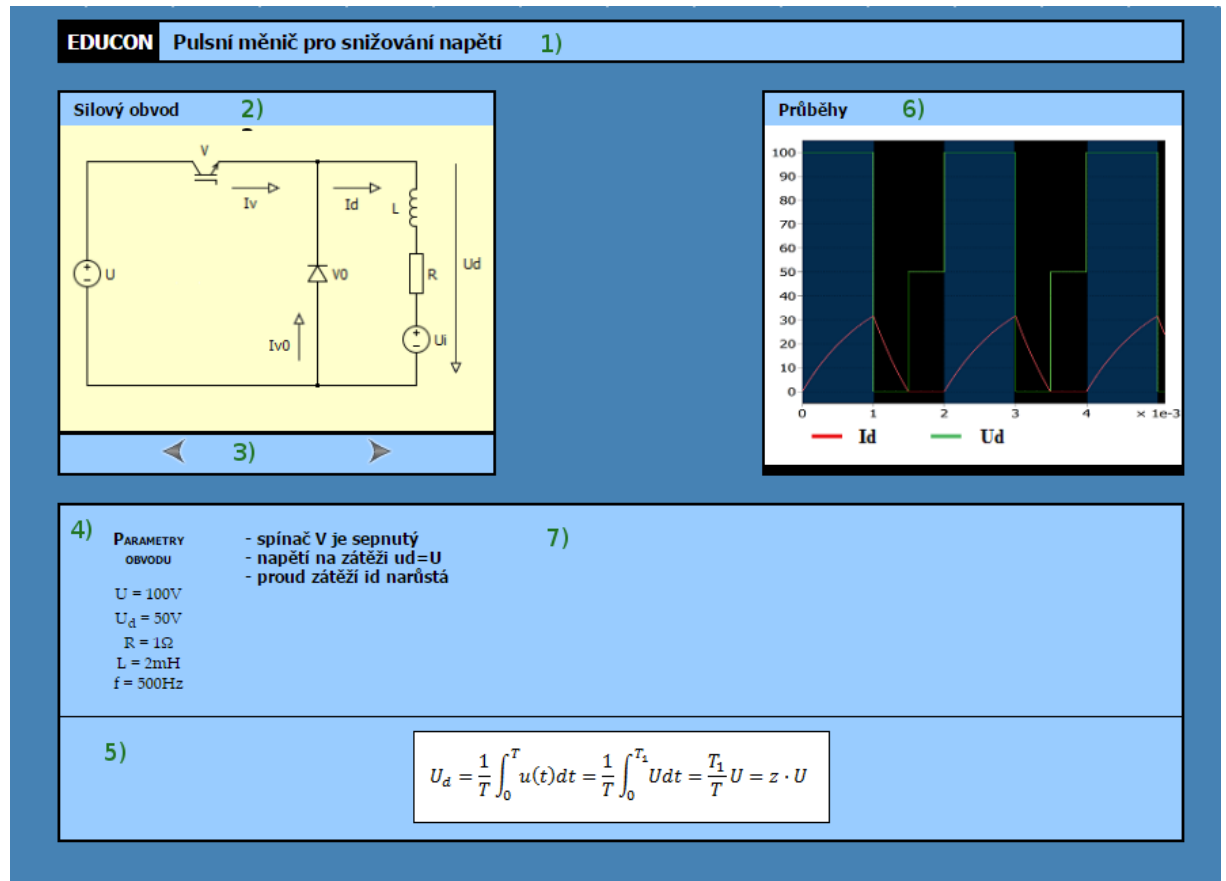
Přerušovaný proud

© 2005 EDUCON - Vytisknout modul

Obrázek 18: Úvodní strana – primární informace o daném polovodičovém měniči

5.1.2 Simulační okno

Simulační okno se uživateli otevře pomocí odkazu, který je umístěn na úvodní straně (kap. 5.2.1.). Je rozvrženo na několika částí zobrazených na obrázku 19.



Obrázek 19: Simulační okno vybraného polovodičového měniče

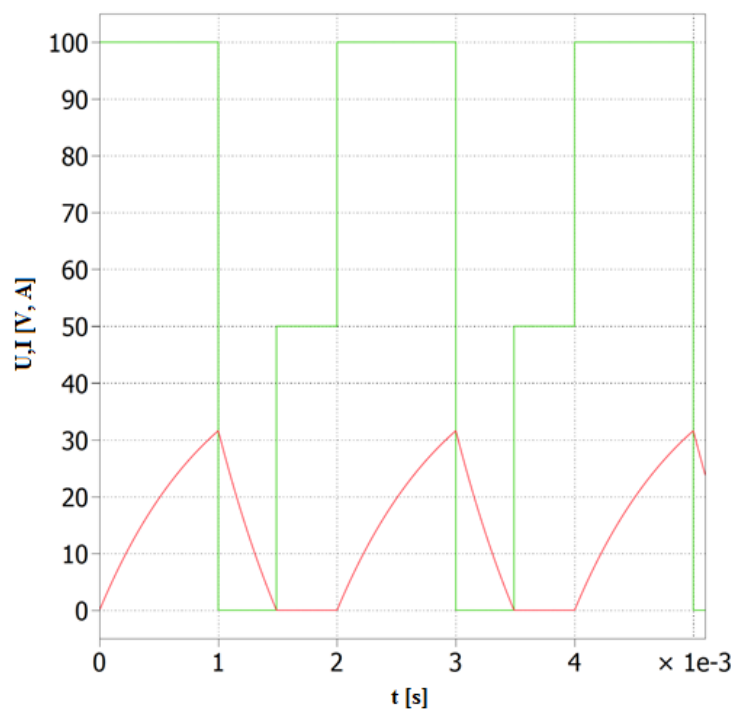
- 1) Titulní lišta – obsahuje název portálu a název vybraného polovodičového měniče pro simulaci
- 2) Silový obvod – obsahuje schéma polovodičového měniče, prvky ze kterých je složen, základní obvodové veličiny a jejich orientaci
- 3) Šipky – umožňují měnit stav simulovaného polovodičového měniče
- 4) Parametry obvodu – parametry silového obvodu zvolené tak, aby byly průběhy dobře vidět
- 5) Vzorec – vzorec, který se vztahuje k danému polovodičovému měniči

- 6) Průběh – zobrazuje výstupní průběhy daného obvodu
- 7) Informace – obsahuje stručný popis simulace daného polovodičového měniče

5.2 Zpracování simulací

V této části bakalářské práce uvádím simulace, které jsem vypracoval pro dané polovodičové měniče:

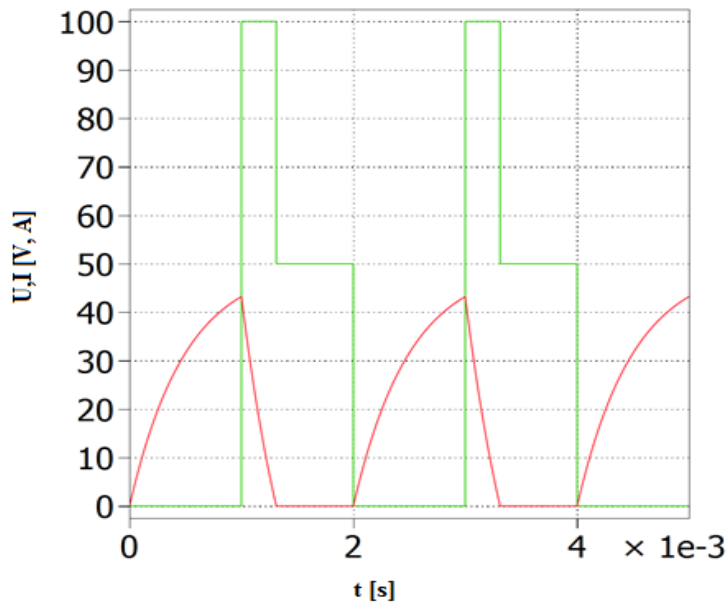
- 1) Pulsní měnič pro snižování napětí



Obrázek 20: Průběh proudu a napětí na zátěži snižovacího pulsního měniče

Na obrázku 20 je znázorněn průběh proudu a napětí na zátěži snižovacího pulsního měniče pro tyto náhodně zvolené hodnoty: $U = 100\text{V}$, $U_i = 50\text{V}$, $R = 1\Omega$, $L = 2\text{mH}$, $z = 0.5$, $f_{\text{pwm}} = 500\text{Hz}$.

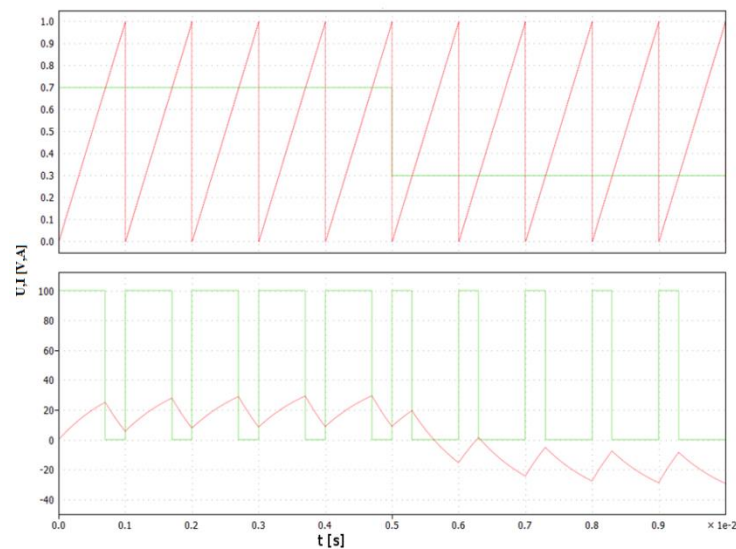
2) Pulsní měnič pro zvyšování napětí



Obrázek 21: Průběh proudu a napětí na zátěži zvyšovacího pulsního měniče

Na obrázku 21 je zobrazen průběh proudu a napětí na zátěži zvyšovacího pulsního měniče pro tyto náhodně zvolené hodnoty: $U = 100\text{V}$, $U_i = 50\text{V}$, $R = 1\Omega$, $L = 5\text{mH}$, $z = 0.5$, $f_{\text{pwm}} = 500\text{Hz}$.

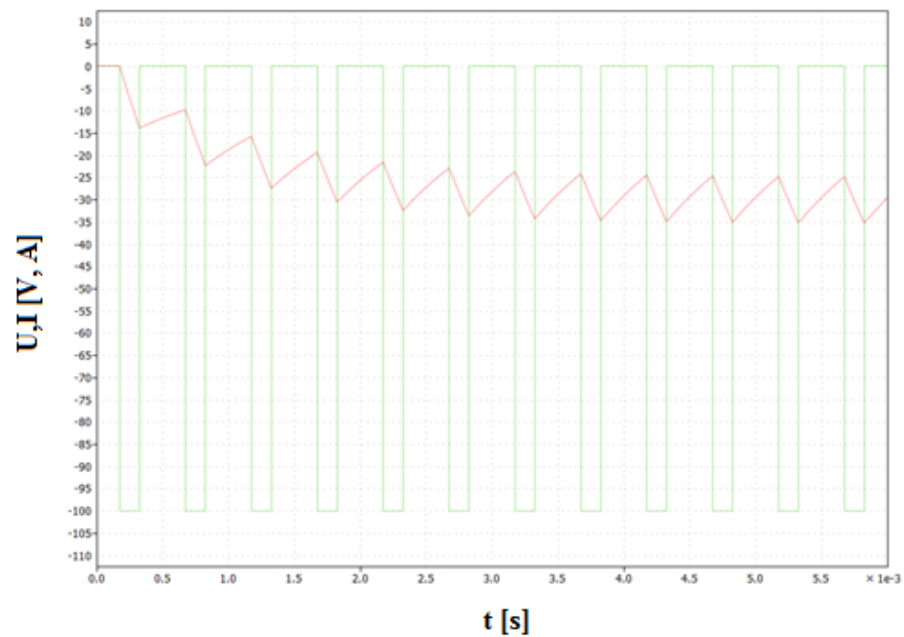
3) Dvoukvadrantový pulsní měnič s reverzací proudu



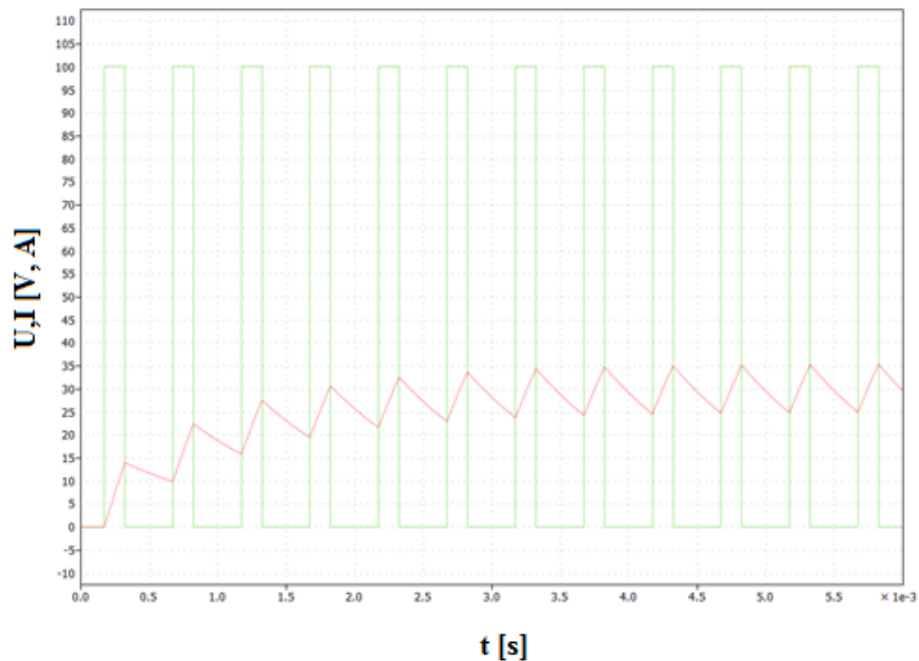
Obrázek 22: Průběh výstupních hodnot dvoukvadrantového pulsního měniče s reverzací proudu

Na obrázku 22 je možné vidět průběh proudu a napětí na zátěži dvoukvadrantového pulsního měniče s reverzací proudu v obou kvadrantech. Náhodně zvolené hodnoty jsou: $L = 0.001\text{mH}$, $U = 100\text{V}$, $U_i = 50\text{V}$, $R = 1\Omega$, $f_{\text{pwm}} = 1000\text{Hz}$.

4) Čtyřkvadrantový pulsní měnič



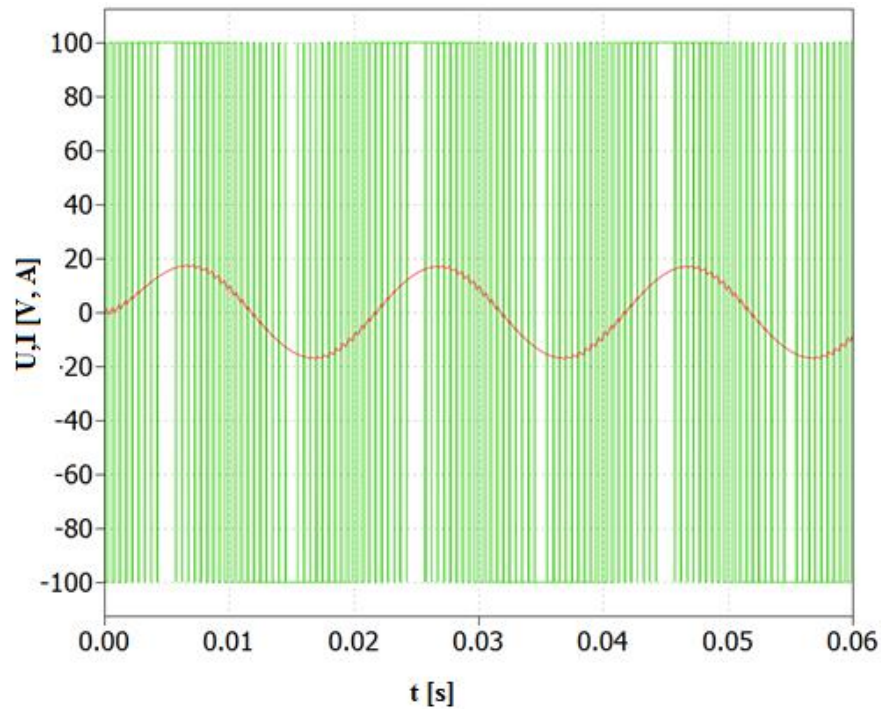
Obrázek 23: Průběh proudu a napětí na zátěži 4kvadrantového pulsního měniče



Obrázek 24: Průběh proudu a napětí na zátěži 4kvadrantového pulsního měniče

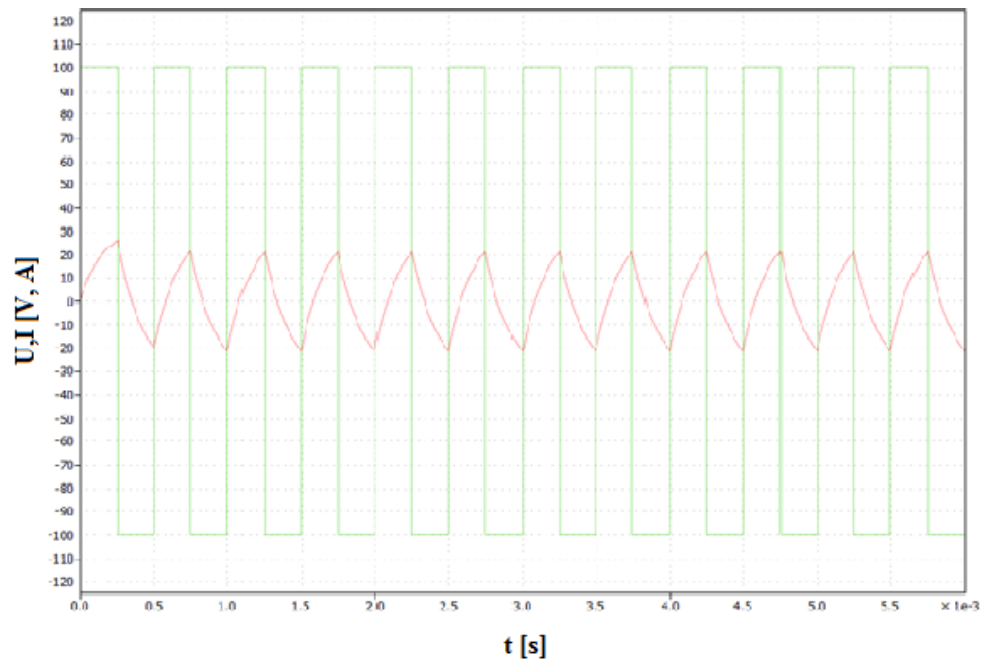
Na obrázku 23 a 24 jsou zobrazeny průběhy proudu a napětí na zátěži čtyřkvadrantového pulsního měniče. Jedná se o unipolární řízení. Náhodně zvolené veličiny jsou pro obě simulace stejné, jen hodnota konstanty, která má dvě polarity: $U = 100\text{V}$, $U_i = 0\text{V}$, $R = 1\Omega$, $L = 1\text{mH}$, $f_{\text{pwm}} = 1000\text{Hz}$, $c = \pm 0.3$.

5) Jednofázový napěťový střídač



Obrázek 25: Průběh proudu a napětí na zátěži 1f střídače při PWM řízení

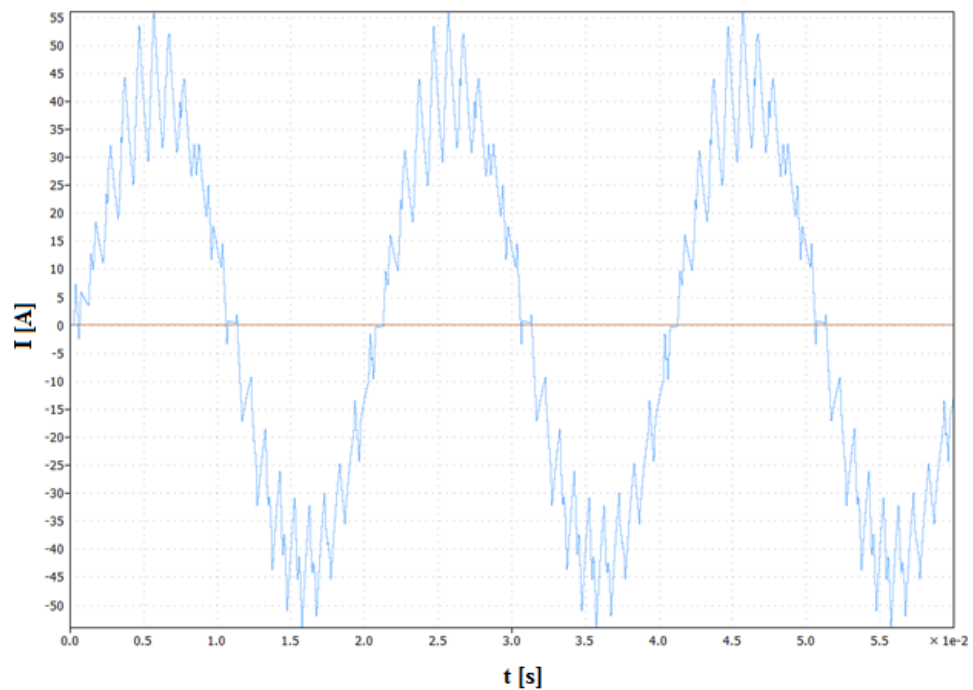
Na obrázku 25 je zobrazen průběh proudu a napětí na zátěži 1f střídače. Tento střídač je řízen PWM. Náhodně zvolené hodnoty pro tuto simulaci jsou: $U = 100\text{V}$, $U_i = 0\text{V}$, $R = 5\Omega$, $L = 10\text{mH}$, $f = 50\text{Hz}$



Obrázek 26: Průběh proudu a napětí na zátěži při řízení pulsním generátorem

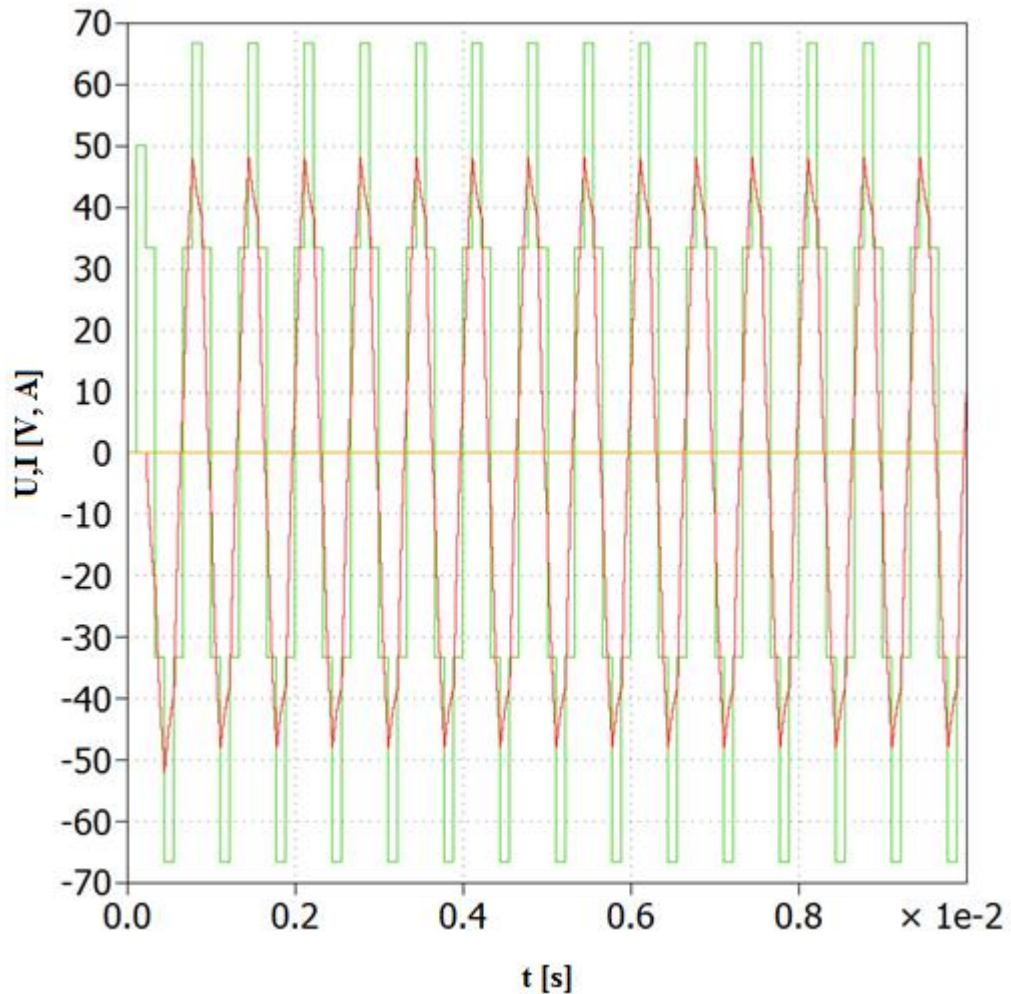
Na obrázku 26 je zobrazen průběh proudu a napětí na zátěži 1f střídače. Tento střídač je řízen obdélníkovým signálem. Náhodně zvolené hodnoty jsou: $U = 100\text{V}$, $U_i = 0\text{V}$, $R = 3\Omega$, $L = 0.5\text{mH}$, $f_{\text{pwm}} = 2000\text{Hz}$.

6) Třífázový napěťový střídač



Obrázek 27: Průběh proudu zátěži 3f napěťového střídače při řízení PWM

Na obrázku 27 je zobrazen průběh proudu zátěží 3f napětového střídače. Střídač je řízen PWM a byly zvoleny tyto hodnoty: $U = 180\text{V}$, $U_i = 0\text{V}$, $R = 1\Omega$, $L = 1\text{mH}$, $f_{\text{pwm}} = 1000\text{Hz}$.



Obrázek 28: Průběh napětí a proudu jedné fáze na zátěži 3f napětového střídače

Obrázek 28 zobrazuje průběh napětí a proudu 3f napětového střídače. Tento střídač je řízen obdélníkovým signálem. Zvolené hodnoty jsou: $U = 100\text{V}$, $U_i = 0\text{V}$, $R = 1\Omega$, $L = 0.1\text{mH}$, $f_{\text{pwm}} = 1500\text{Hz}$.

6 Databáze zkušebních otázek

Webový portál EDUCON by měl do budoucna sloužit nejen jako výukový portál, ale také k ověření základních znalostí z oboru výkonové elektroniky („EDUTEST“).

Ověřování znalostí by mělo probíhat stylem on-line testů, jež se zpřístupní jen přihlášenému studentovi. Kvůli úniku informací bude muset být testovací portál velmi dobře zabezpečený. Databáze testovacích otázek by měla obsahovat dostatek informací, aby mohly být otázky náhodně generovány a zároveň nedošlo ke shodě dvou testů. Po dokončení testu se studentovi okamžitě zobrazí správné výsledky a celkové hodnocení.

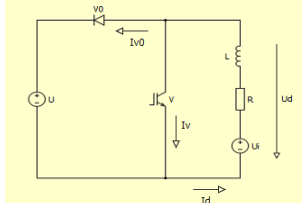
Doplnění databáze zkušebních otázek bude přenecháno studentům z jiné fakulty, protože studijní plán mého oboru nezahrnuje programování PHP, ani práci v systému MySQL.

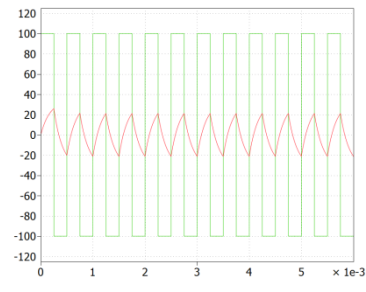
Uvádím zde několik příkladů pro představu, jak by mohly testové otázky vypadat:

1) Ve kterých kvadrantech může pracovat dvoukvadrantový pulsní měnič s reverzací proudu?
a) Ud, Id
b) Ud, -Id
c) -Ud, Id
d) -Ud, -Id
e) Nelze rozhodnout

2) Mezi vypínatelné součástky patří:
a) Bipolární tranzistor
b) Unipolární tranzistor
c) Triak
d) Tyristor
e) Dioda
f) GTO
g) IGBT
h) Jiná možnost

3) Jaká všechna napětí najdeme na 3f střídači?
a) Fázové napětí střídače
b) Fázové napětí zátěže
c) Napětí zdroje
d) Napětí diody
e) Napětí indukčnosti
f) Sdružené napětí střídače
g) Jiná možnost

4) Na obrázku je schéma zapojení pro:

a) Snižovací pulsní měnič
b) Zvyšovací pulsní měnič
c) Jednofázový napěťový střídač
d) Třífázový napěťový střídač
e) Jiná možnost

5) Který polovodičový měnič má průběhy výstupních hodnot na zátěži stejné jako na tomto obrázku?

a) Zvyšovací pulsní měnič
b) Snižovací pulsní měnič
c) Jednofázový napěťový střídač
d) Třífázový napěťový střídač
e) Jiná možnost

6) Pod pojmem PWM se rozumí
a) Obdélníkové amplitudové řízení
b) Obdélníkové šířkové řízení
c) Šířkové pulsní řízení
d) Šířkové pulsně modulované řízení
e) Řízení v kaskádě
f) Jiná možnost

7) Třífázový napěťový střídač obsahuje tyto prvky:
a) Zdroj stejnosměrného napětí
b) 6 diod
c) 8 vypínatelných součástek
d) Zdroj střídavého napětí
e) Jiná možnost

8) Indukčnost na zátěži u pulsního snižovacího měniče ovlivňuje
a) Velikost napětí
b) Velikost proudu
c) Exponenciální nárůst/pokles napětí vlivem přechodového děje
d) Exponenciální nárůst/pokles proudu vlivem přechodového děje
e) Nic neovlivňuje
f) Jiná možnost

9) Pulsní měnič pro snižování napětí – při sepnutí spínače je napětí u_d rovno:
a) $u_d = 0$
b) $u_d = u_i$
c) $u_d = U$
d) $u_d = u_R$
e) Jiná možnost

10) Čtyřkvadrantový pulsní měnič má silový obvod stejný jako:
a) Pulsní měnič snižovací
b) Pulsní měnič zvyšovací
c) 1f napěťový střídač
d) 3f napěťový střídač
e) Jiná možnost

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit obrazové materiály a simulace vybraných polovodičových měničů s vlastní komutací, popsat a vysvětlit jejich princip a chování. Jednotlivé simulace byly zpracovány takovým způsobem, aby se výstupní průběhy podobaly teoretickým průběhům. Zpracované simulace jsou pomůckou a zároveň podkladem k rozšíření modulu výkonové elektroniky o principy a chování polovodičových měničů s vlastní komutací ve výukovém systému EDUCON. Snahou bylo vytvořit a graficky upravit všechny výstupní průběhy tak, aby byly jednoduché, srozumitelné a snadno pochopitelné všem uživatelům (především studentům) internetového portálu EDUCON.

Byla popsána schémata i principy a chování vybraných polovodičových měničů s vlastní komutací. Simulace pro dané měniče (pulsní měnič pro snižování napětí, pulsni měnič pro zvyšování napětí, dvoukvadrantový pulsni měnič s reverzací proudu, čtyřkvadrantový pulsni měnič, jednofázový napěťový střídač a třífázový napěťový střídač) byly vytvořeny s pomocí programů MATLAB, Simulink a PLECS.

Tyto simulace byly dále zpracovány v grafických editorech tak, aby bylo možné sledovat jednotlivé takty vybraných měničů. Obsah simulací daných polovodičových měničů byl naformátován s použitím programovacích jazyků HTML a CSS. Simulace tak mohly být nahrány na webový portál EDUCON, kde byly ještě k jednotlivým simulacím doplněny základní informace.

V poslední části bakalářské práce jsou uvedené vzorové zkušební otázky, které mohou v budoucnu sloužit k rozšíření databáze online testů. Tam by si mohli studenti ověřit své znalosti a porozumění dané problematiky z oblasti výkonové elektroniky.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika - Svazek III.* 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003.
- [2] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika - Svazek 3 – Měniče s vlastní komutací a bez komutace - Část 1 – Pulsní měniče.* 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2012.
- [3] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektrotechnika.* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006.
- [4] PAVLÍČEK, Jiří. *Multimediální podpora výuky – princip chování základních polovodičových měničů.* Diplomová práce. FEL. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005.
- [5] PAVELKA, Jiří a ČEŘOVSKÝ, Zdeněk. *Výkonová elektronika.* 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002.
- [6] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika – Svazek II.*
- [7] DABNEY, James B.. and HARMAN, Thomas L.. *Mastering SIMULINK.* 1. vyd. United States of America: Pearson Education, Inc., 2004.
- [8] ZAPLATÍLEK, Karel a DOŇAR, Bohuslav. *Matlab pro začátečníky.* 2. vyd. Praha: Ben, 2005.
- [9] PLECS [online].[cit. 2016-05-15]. Dostupné na www: <http://www.plexim.com/>
- [10] DOMES, Martin. *Tvorba internetových stránek pomocí HTML, CSS a JavaScriptu.* 1. vyd. Prostějov: Computer media s. r. o., 2005.

proud zátěže pokračuje vlivem energie akumulované v L do zdroje U

křivkou proudu jsou exponenciály klesající k hodnotě $(U_i - U) / R$

nestačí-li i_d v intervalu vypnutí klesnout k nule, je nepřerušovaný

Energie je odčerpávána zdroji U_i a L . Část energie se ztrácí na R a zbytek přijímá zdroj U (strana vyššího napětí).

U zvyšovacího pulsního měniče je možno výkon přenášet pouze ze zátěže do zdroje.

Střední hodnota napětí:

U_{di} ... ideální střední hodnota napětí na zátěži

z ... poměrná doba sepnutí (0 ≤ z ≤ 1) (T_1 - doba sepnutí prvku V , T - perioda PWM)

Střední hodnota proudu zátěže v ustáleném stavu:

$I_d = (U_i - U_d) / R$

Uvažujeme, že v ustáleném stavu je střední hodnota napětí na L nulová.

Příloha B – Simulační okno

```

<!DOCTYPE html PUBLIC "-//W3C//DTD XHTML 1.0 Strict//EN"
"http://www.w3.org/TR/xhtml1/DTD/xhtml1-strict.dtd">
<html xmlns="http://www.w3.org/1999/xhtml">
  <head>
    <meta http-equiv="Content-Type" content="text/html; charset=utf-8" />
    <link rel="stylesheet" type="text/css" href=" ../css/style.css"/>
    <title>EDUCON - Pulsní měnič</title>
  </head>
  <body>
    <h1 id="title"><span id="educon">EDUCON</span>Pulsní měnič pro snižování napětí</h1>
    <div class="empty vspase">&nbsp;</div>
  <div id="circuit">
    <h2>Silový obvod</h2>
    <p class="image"></p>
    <div id="navigation"><span id="nav-back"><a href="index2.htm"></a></span><span id="nav-forward"><a href="index1.htm"></a></span></div>
    </div>
    <div id="process">
      <h2>Průběhy</h2>
      <div class="image"></div>
    </div>
    <div class="empty vspase">&nbsp;</div>
    <div id="info">
      <div id="params"><h3>Parametry<br />
obvodu</h3><p>U<sub></sub>&nbsp;&nbsp;&nbsp;=&nbsp;&nbsp;&nbsp;100V<br />U<sub>d</sub>&nbsp;&nbsp;&nbsp;=&nbsp;&nbsp;&nbsp;50V<br
/>R&nbsp;&nbsp;&nbsp;=&nbsp;&nbsp;&nbsp;1&Omega;<br />L&nbsp;&nbsp;&nbsp;=&nbsp;&nbsp;&nbsp;2mH<br />f&nbsp;&nbsp;&nbsp;=&nbsp;&nbsp;&nbsp;500Hz</p></div>
      <div id="description">
        <p>
          - spínač V je sepnutý<br />
          - napětí na zátěži ud=U<br />
          - proud zátěží id narůstá <br />
        </p>
      </div>
    </div>
  <div id="equation">

```