

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Modelování zdroje vysokého napětí

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan KROUPAR**
Osobní číslo: **E11B0046P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Modelování zdroje vysokého napětí**
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. Prostudujte možnosti řešení zdroje stejnosměrného napětí v řádu 500V-5kV pro odběry do 1mA.
2. Proveďte modelování obvodů ve vhodném simulačním softwaru.
3. Zhodnoťte dosažené výsledky a vyberte nejvhodnější řešení.

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. Jan Broulím

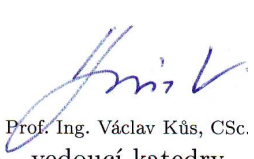
Regionální inovační centrum elektrotechniky

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

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


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Tato bakalářská práce je rozdělena na tři základní části. V první části jsou popsány simulační programy a uvedeny příklady simulačních softwarů. Druhá nejobsáhlejší část popisuje možnosti řešení zvyšování napětí. Tato druhá část se dělí na dvě sekce, do kterých jsou rozděleny měniče podle druhu napájení. U jednotlivých měničů je popsán princip funkce obvodu a uvedeny základní vztahy pro výpočet hodnot součástek. Třetí část obsahuje simulaci měničů, které se jeví jako nejefektivnější ke konverzi na vysoké výstupní napětí. V závěru je zhodnocena využitelnost jednotlivých obvodů.

Klíčová slova

Násobič napětí, transformátor, usměrňovač, simulační software, AC/DC měniče, DC/DC měniče, spínané měniče, snižující měnič, zvyšující měnič, propustný měnič, akumulující měnič, dioda, tranzistor, kondenzátor, HPGE detektor, Graetzov můstek, výstupní průběhy napětí, zvlnění.

Annotation

This thesis is divided into three parts. The first section describes the simulation software and provides examples of simulation software. The second part, the most comprehensive, describes possibilities of solutions to increase voltage. This second part is divided into two sections into which they are divided according to the type of power converters. For each converter is described axiom of circuit function and there are described the basic connections for the calculation of the value of components. The third part includes a simulation of converters what appears as the most effective to convert the high voltage output. In conclusion is evaluated the applicability of the individual circuits.

Key words

The multiplier voltage transformer, rectifier, simulation software, AC / DC converters, DC / DC converters, switching converters, reducing converter, boost converter, forward converter, accumulating converter, diode, transistor, capacitor, HPGE detector, Graetz bridge , output voltage, waveforms ripple.

Prohlášení

Prohlašuji , že jsem tuto diplomovou/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 diplomové/bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 6.6.20014

.....

Jan Kroupar

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Broulímovi za vstřícný přístup a poskytnutí cenných rad při vypracovávání bakalářské práce.

Obsah

1 Úvod	10
2 Simulační software	11
2.1 Elektrické obvody	11
2.2 Elektromagnetické pole	11
3 Možnosti řešení zvyšování napětí	12
3.1 AC/DC měniče	12
3.1.1 Transformátor s usměrňovačem	12
3.1.2 Násobiče napětí	16
3.2 DC/DC měniče	19
3.2.1 Násobič stejnosměrných napětí	19
3.2.2 Zvyšující měnič	20
3.2.3 Jednočinný akumulující měnič	21
3.2.4 Jednočinný propustný měnič	22
3.2.5 Rezonanční měnič	23
3.2.6 Dvojčinný měnič v zapojení push-pull	24
3.2.7 Dvojčinný měnič v zapojení polomost	25
3.2.8 Dvojčinný měnič v zapojení plný most	26
4 Praktická úloha	28
4.1 Kaskádní násobič	28
4.2 Zvyšující měnič	31
4.3 Transformátor s usměrňovačem	32
5 Závěr	35
A Příloha	37
A.1 Kaskádní násobič	37
A.2 Zvyšovací měnič	38
A.3 Usměrňovač	38

Seznam symbolů a zkratek

C	Kapacita
f	Kmitočet
I	Elektrický proud
L	Indukčnost
n	Počet stupňů
N	Počet závitů
p	Převod
P	Výkon
p_p	Zvlnění
P_z	Ztrátový výkon
S	Zdánlivý výkon
t	Čas
u_i	Indukované napětí
U_i	Elektrické napětí
W	Energie
ϕ	Magnetický tok

1 Úvod

Zdroj s výstupním stejnosměrným napětím je velmi využíván pro napájení elektroniky. Většina elektronických obvodů je napájena stejnosměrným napětím. Napájecí zdroj má za úkol dodávat napětí o velikosti, které je potřebné pro napájení zařízení. Další parametry zdroje jsou podřízeny dle napájecího zařízení. Nejčastěji se klade důraz na stabilizaci napětí, zvlnění a proudovou zatížitelnost. Důležitou roli hraje také ekonomická situace, často se využívá nejlevnější konstrukce spolu s vysokou účinností zdroje. Pro nízké výkony účinnost nehraje tak velkou roli, neboť ztráty jsou nízké. Zejména u vyšších výkonů hraje roli také vliv zdroje na síť, tedy odběr vyšších harmonických. Nejčastěji je zdroj napájen ze střídavé sítě, která musí být usměrněna. Zdroj také může být napájen z baterie.

V této práci je požadován zdroj vysokého napětí pro napájení polovodičového detektoru. Principy získání vysokého napětí jsou rozebrány v první části, kde je popsán základní princip transformátoru a jeho použití, princip základních typů usměrňovačů, násobičů napětí a spínaných zdrojů. V další části je provedena simulace kaskádního násobiče a zvyšujícího měniče, které se jeví jako nejefektivnější pro získání napětí o velikosti 3 kV.

2 Simulační software

Simulace se provádějí k namodelování daného problému. Využívají se ve většině odvětví, kde se ověřují návrhy výrobků před samotnou realizací. V oblasti elektrotechniky se často využívá simulace v oblasti elektrických obvodů, elektromagnetického pole a teplotního pole. Pomocí simulačních softwarů lze ověřit funkčnost návrhu, ale také vylepšit a zdokonalit výrobek navržený výpočtem. Simulace pomáhají šetřit čas tím, že není nutná stavba více prototypů pro zkušební účely. Tím pádem simulace zlepšuje efektivitu návrhu a výrazně snižuje náklady na vývoj daného výrobku. Existuje spousta simulačního softwaru. K dispozici jsou placené, ale i volné verze. [7].

2.1 Elektrické obvody

Většina simulačních programů pracuje s modely obvodů složených z jednotlivých součástí, které mají své vlastní modely. Výpočet simulací probíhá pomocí numerických metod. Výsledek simulace je tedy ovlivněn zejména vstupním modelem a zároveň modelem jednotlivých součástí. Většina simulačních programů umožňuje více druhů analýz. Základní používané programy jsou: PSpice, LTspice, Tina, Simulink...

LTspice má více možností analýzy obvodu:

- DC analýza pracuje s nezávislým zdrojem napětí nebo proudu. Může měnit velikost proudu nebo napětí v nastavených mezích s určitým krokem.
- AC analýza je řešena pomocí fázorů napětí, které jsou počítány pro každou velikost frekvence.
- Přechodová analýza umožňuje modelovat přechodové děje v nastaveném intervalu času. U zdrojů napětí a proudu lze použít různé druhy signálů.
- Parametrická analýza dovoluje měnit v průběhu simulace parametry obvodu.
- Stejnoseměrná přenosová analýza dovoluje určit napěťovou odezvu zdroje [12].

2.2 Elektromagnetické pole

Většina simulačních programů v této oblasti numericky počítá rozložení elektromagnetického pole. Pro výpočet je nejprve nutné vytvořit geometrii řešeného problému, kde jsou popsány i vlastnosti materiálů. Základní používané programy jsou: Matlab, Ansys, Agros,2D, QuickField, Femm...

3 Možnosti řešení zvyšování napětí

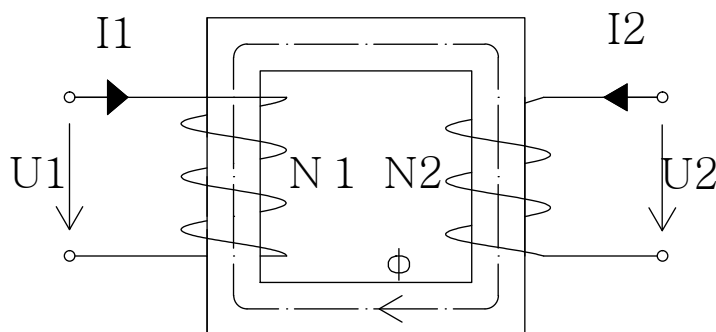
Pro konverzi úrovně napětí lze využít více způsobů. Následující zapojení jsou ta, která by šla teoreticky využít při získání vyššího napětí z nižšího. Popsány jsou způsoby dle napájecího napětí, zda zvyšování je prováděno ze střídavého nebo stejnosměrného napětí.

3.1 AC/DC měniče

AC/DC označují měniče, které mění střídavé napětí na stejnosměrné. Mezi tyto měniče nejčastěji patří usměrňovače. Tyto měniče jsou v elektronice využívány jako zdroje pro stejnosměrné napájení jako například nabíječky. Moderní zdroje kvůli velikosti a účinnosti stále více využívají spínané měniče DC/DC. Před ně se umísťuje měnič AC/DC (nejčastěji usměrňovač).

3.1.1 Transformátor s usměrňovačem

Transformátor Je elektrický stroj, který neobsahuje pohyblivé mechanické části. Tento stroj slouží k transformaci elektrického napětí a proudu. Tím pádem nutně transformuje i impedanci. Transformátory se používají zejména k transformaci napětí, impedance. Lze ho ale také požit pro galvanické oddělení obvodu. Transformátor je složen z primárního a sekundárního vinutí a magnetického obvodu. Magnetický obvod se skládá pomocí transformátorových plechů kvůli snížení ztrát vířivými proudy. Pro vyšší frekvence se využívá feritový magnetický obvod. Princip transformátoru lze popsat tak, že při průchodu proudu primární indukčností se indukuje magnetický tok, který pomocí dobře magneticky vodivého magnetického obvodu prochází primárním i sekundárním vinutím. Magnetický tok indukuje ve vinutích napětí. Velikost napětí ovlivňuje velikost magnetického toku, počet závitů a frekvence. Transformátor se využívá v přenosové síti, pro transformaci na vysoké napětí a poté zpětně na nízké z důvodu snížení ztrát. Dále se transformátor využívá jako zdroj pro elektronické obvody doplněný vhodnou elektronikou. Je také součástí spínaných zdrojů. Používá se také pro oddělení obvodů a také jako transformátor impedance .



Obrázek 1: Transformátor [1]

Indukované napětí lze vyjádřit jako:

$$u_i = N \frac{d\phi}{dt} = 4,44 \cdot \phi f N, \quad (1)$$

převod lze vyádřit jako poměr vstupního ku výstupnímu napětí:

$$p = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{4,44 \cdot \phi f N_1}{4,44 \cdot \phi f N_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (2)$$

indukované napětí odpovídá svorkovému napětí na vinutí, můžeme tedy vyádřit:

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (3)$$

Jelikož transformátor je uvažován jako ideální, nemá tedy žádné ztráty. To znamená, že vstupní i výstupní zdánlivý výkon musí být stejný.

$$S_1 = S_2, \quad (4)$$

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2, \quad (5)$$

z toho lze vyádřit,

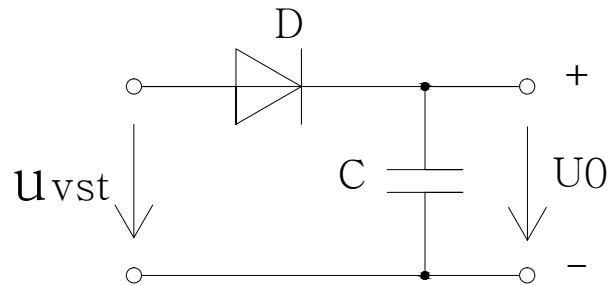
$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (6)$$

Kde: ϕ [Wb] je magnetický tok, f [Hz] je frekvence, N [-] je počet závitů, N_1 [-] je počet závitů na primárním vinutí, N_2 [-] je počet závitů na sekundárním vinutí, U_1 [V] je napětí na primárním vinutí, U_2 [-] je napětí na sekundárním vinutí, I_1 [V] je proud na primárním vinutí, I_2 [-] je proud na sekundárním vinutí [1, 2].

Usměrňovač Připojením usměrňovače na výstup transformátoru získáme usměrněné napětí. K usměrnění se využívá nelineární prvek. U neřízených usměrňovačů se využívá polovodičových diod, u řízených usměrňovačů se nejčastěji využívá tyristorů. Usměrňovače mohou být jednofázové nebo vícefázové. Vícefázové mají méně zvlněné napětí, proto se využívají pro vyšší výkony. Pro nižší výkony je vhodnější jednodušší jednofázové zapojení, neboť pro napájení postačuje jednofázová síť. Vyhlazení napětí se provádí pomocí kondenzátoru. Dále se dělí na jednocestné dvoucestné a můstkové.

Jednocestný usměrňovač Je nejjednodušší zapojení usměrňovače. Skládá se pouze z jednoho usměrňovacího prvku diody nebo tyristoru a vyhlazovacího kondenzátoru. Toto zapojení je vhodné pouze pro malé proudy. Použití pouze pro malé proudy vychází z jeho principu. Usměrňovač vede vždy pouze půl periody, kdy je dioda otevřena v propustném směru. V druhé půlce je dioda polarizovaná v závěrném směru a proud nevede. Proto toto zapojení způsobuje velké zvlnění, kdy dokonce půl periody usměrňovačem nic neprochází. To klade velké nároky na vyhlazovací kondenzátor. Velikost kapacity musí být

volena v závislosti na zvlnění proudu a velikosti odebíraného proudu tak, aby hodnota napětí v druhé polovině periody neklesla pod požadovanou mez, kdy energii zátěži dodává kondenzátor.



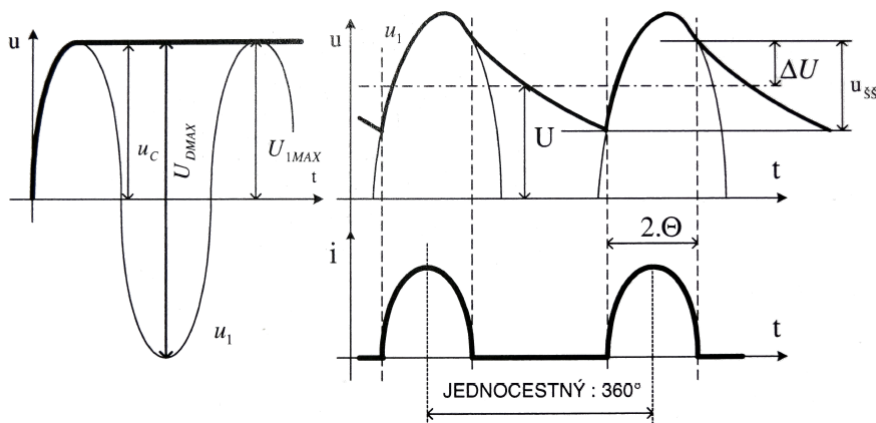
Obrázek 2: Jednocestný usměrňovač [2]

Dioda musí být dimenzovaná na napětí v závěrném směru na maximální velikost vyplývající z Kirchoffova zákona. Maximální hodnota napájecího napětí $\sqrt{2}U_{vst}$ se sčítá s maximálním napětím na kondenzátoru $\sqrt{2}U_{vst}$. Kde U_{vst} je efektivní hodnota střídavého napětí na vstupu usměrňovače.

$$U_R > 2 \cdot \sqrt{2}U_{vst}. \quad (7)$$

Proudové dimenzování se volí dle velikosti střední hodnoty proudu $I_{stř}$, neboť dioda pracuje pouze v polovině periody. Střední hodnota odpovídá oteplení ztrátovým výkonem. Obvykle se volí dostatečná rezerva proudové zatížitelnosti. Ztrátový výkon se spočítá z velikostí střední hodnoty proudu a napěťového úbytku na diodě. V případě křemíkové diody je velikost úbytku přibližně 0,7V.

$$P_z \doteq 0,7 \cdot I_{stř}. \quad (8)$$



Obrázek 3: Průběhy výstupního napětí a proudu [1]

Velikost zvlnění p_p se udává jako poměr rozkmitu napětí $U_{\bar{s}-\bar{s}}$ ku střední hodnotě U_0 :

$$p_p = \frac{U_{\dot{s}-\dot{s}}}{U_0} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Velikost kapacity lze spočítat pomocí diferenciální rovnice vybíjení kondenzátoru nebo v literatuře existuje empirický vzorec, který bere v úvahu frekvenci, střední hodnotu proudu, zvlnění a střední hodnotu výstupního napětí. Usměrňovač nejčasteji bývá napájen ze sítě proto $f = 50\text{Hz}$.

$$C_{min} = \frac{2\pi f I_{stř}}{p_p \cdot U_0} \doteq \frac{600 \cdot I_{stř}}{p_p \cdot U_0}. \quad (10)$$

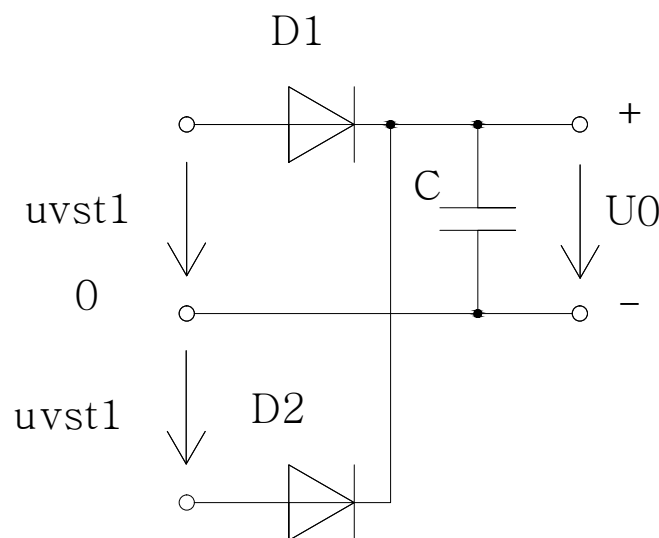
Kde : C_{min} [μF] je minimální kapacita, f [Hz] výstupní frekvence, $I_{stř}$ [mA] je střední hodnota proudu na výstupu, p_p [%] je převod, U_0 [V] je střední hodnota napětí.

Kondenzátor musí být dimenzován na napětí o maximální hodnotě U_C :

$$U_c > \sqrt{2}U_{vst}. \quad (11)$$

[1, 2]

Dvoucestný usměrňovač Je tvořen dvěma cestami, které tvoří polovodičové prvky. Toto zapojení je už použitelnější pro větší výkony, neboť proud vede půl periody jeden prvek a druhou polovinu druhý. Z toho je patrné, že výstupní průběh má frekvenci dvakrát větší než zdroj. Díky této vlastnosti jsou menší požadavky na kondenzátor. Kondenzátor pokrývá menší plochu než u jednocestného usměrňovače, tím pádem stačí menší akumulovaná energie, a tím i menší kapacita. Nevýhoda tohoto zapojení je, že usměrňovač potřebuje napájecí transformátor s vyvedeným středem vinutí.



Obrázek 4: Dvoucestný usměrňovač [2]

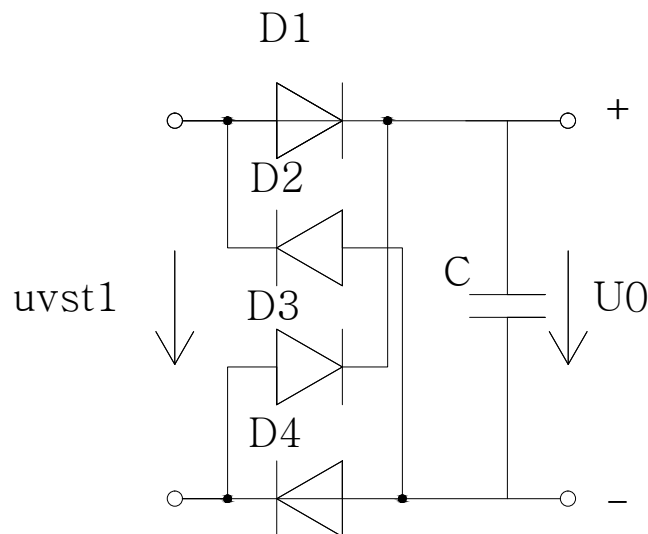
Proudové dimenzování se volí dle poloviny střední hodnoty výstupního proudu $I_{stř}$, neboť

druhá polovina teče druhou diodou. Střední hodnota odpovídá oteplení zráťovým výkonem. Obvykle se volí dostatečná rezerva proudové zatížitelnosti. Ztrátový výkon se spočítá z velikostí střední hodnoty proudu a napěťového úbytku na diodě. V případě křemíkové diody je velikost úbytku 0,7 V.

$$P_z = 0,7 \cdot \frac{I_{stř}}{2}. \quad (12)$$

Kde : P_z [W] je ztrátový výkon, $I_{stř}$ [mA] je střední hodnota proudu na výstupu. Ostatní dimenzování je stejné jako v případě jednocestného usměrňovače [1, 2].

Můstkový usměrňovač Je tvořen čtyřmi polovodičovými prvky. Průběh jeho výstupu je obdobný jako u dvoucestného usměrňovače pouze s tím rozdílem, že v tomto zapojení je úbytek na obou diodách místo na jedné. Jeho hlavní výhoda je, že nepotřebuje vyvedený střed vinutí. Při kladné půlplně jsou v propustném směru diody D1, D4, které vedou proud. Při záporné půlplně jsou v propustném směru diody D2, D3. Dimenzování je stejné jako u předchozích usměrňovačů, pouze napěťové dimenzování lze uvažovat $U_R > U_0$ a to pouze za předpokladu, že závěrná napětí diod budou shodná [1, 2].

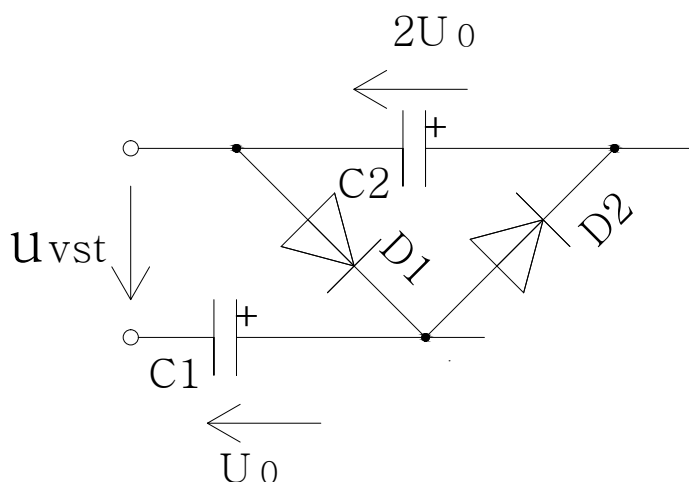


Obrázek 5: Můstkový usměrňovač [2]

3.1.2 Násobiče napětí

Násobiče jsou obvody, které slouží k násobení vstupního napětí. Používají se tam, kde potřebujeme získat vyšší napětí než vstupní. Násobiče lze využít tam, kde by bylo neekonomické použít transformátor. U transformátoru na velké napětí a malý proud je problém izolace tenkých drátů vinutí. Násobič je založen na principu usměrňovače. Jednotlivé stupně usměrňovačů jsou zapojeny tak, aby pro střídavé napájení byly spojeny paralelně. A pro výstupní stejnosměrné napětí byly seriově.

Jednocestný zdvojovač napětí Je nejjednodušší násobič napětí. Jeden stupeň se skládá z jedné diody a jednoho kondenzátoru. Jeho princip funguje na nabíjení kondenzátorů, které jsou spojeny vzhledem k výstupu seriově a jejich akumulované napětí se sčítá a dodává do zátěže. Vzhledem k tomu, že kondenzátory jsou zapojeny sériově, se výsledná kapacita snižuje. Z toho vyplývá, čím více stupňů, tím je násobič schopen dodávat menší proud. Při kladné půlvlně se otevře dioda D1 a kondenzátor C1 se nabije na maximální hodnotu napájení U_0 , dioda D2 je uzavřena a kondenzátor C2 se nenabíjí. Při průchodu záporné půlvlny se uzavírá dioda D1 a D2 se otevírá. Aby ve smyčce platil součet všech napětí roven nule, kondenzátor se nabije na velikost $2U_0$. Tím vznikne dvojnásobné napětí na výstupu.



Obrázek 6: Dvojstupňový násobič napětí [2]

$$U_0 = \sqrt{2}U_{vst}. \quad (13)$$

Tím napětí na C2 bude mít velikost:

$$2U_0 = \sqrt{2}U_{vst} + U_0. \quad (14)$$

Dle napětí na jednotlivých stupních musí být voleny kondenzátory minimálně na $U_{c1} > U_0$ a kondenzátor $U_{c2} > 2U_0$ pro diody platí $U_{dz} > 2U_0$ [2, 5, 6].

Kaskádní jednocestný násobič Vyššího napětí lze dosáhnout kaskádovým spojením jednocestného zdvojovače. Počet stupňů teoreticky může být nekonečný. Prakticky se dá využít maximálně 10-20 stupňů. To z důvodu úbytku napětí na diodách, svodového odporu kondenzátorů a také snižující se proudové zatížitelnosti. Z obrázku 6 lze vidět, že dole jsou liché násobky a nahoře sudé.

Výsledné napětí se spočte pomocí vztahu:

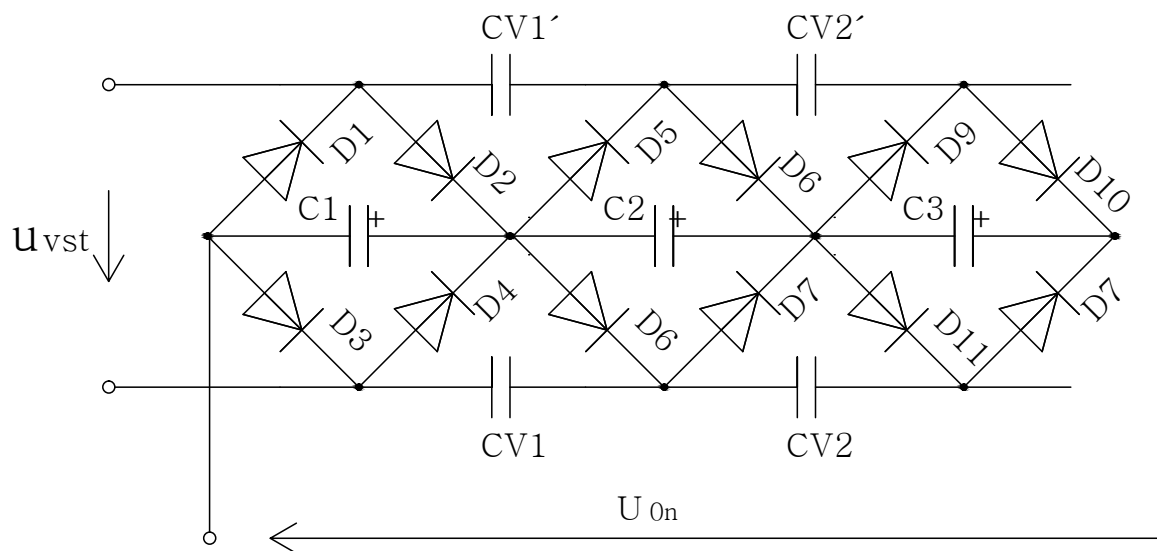
$$U_{0n} = n \cdot \sqrt{2}U_{vst}. \quad (15)$$

Velikost kapacity lze vypočítat pomocí empirického vzorce:

$$C_n > \frac{2n \cdot (n + 2) \cdot I}{U_0 \cdot f}. \quad (16)$$

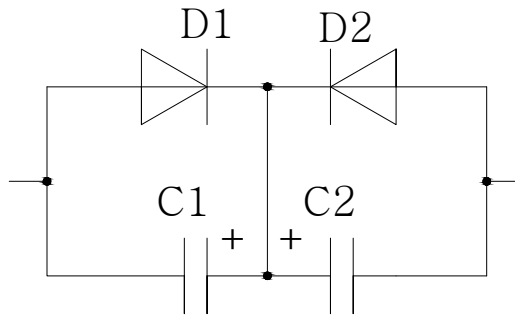
Kde: C_n [F] je velikost kondenzátoru, n je počet stupňů, I [A] je střední hodnota proudu do zátěže, U_0 [V] střední hodnota napětí základního stupně, f [Hz] je frekvence vstupního napětí U_{vst} [2, 6].

Kaskádní dvoucestný násobič z Graetzových můstků Tento násobič je řazen pomocí můstkových usměrňovačů. Jeho princip funguje tak, že se přes diody D1-4 nabije kondenzátor C na hodnotu U_0 , při spojení více stupňů se na stejnou hodnotu nabijí i ostatní kondenzátory. Výsledné napětí je pak součet napětí na kondenzátorech C_n . Rostoucí počet vazebních kondenzátorů omezuje nabíjecí proud do dalších stupňů. Kapacita vazebních kondenzátorů musí proto být větší než nabíjecích kondenzátorů. Vzhledem k tomu, že vazební kondenzátory musí vydržet střídavé napětí, nelze využít elektrolytické kondenzátory. Musí se využívat bipolární např. svitkové, které mají malou kapacitu. Pro využití elektrolytického kondenzátoru se musí obvodově upravit (viz obr.8.) Náhradu bipolárního kondenzátoru lze vytvořit pomocí dvou elektrolytických kondenzátorů a dvou diod. Při opačném napětí na kondenzátoru se otevře dioda a tím vyřadí C1 a funkci kondenzátoru převezme správně orientovaný C2 [2].



Obrázek 7: Kaskádní dvoucestný násobič z Graetzových můstků [2]

$$U_{0n} = n \cdot \sqrt{2} U_{vst} = n \cdot U. \quad (17)$$



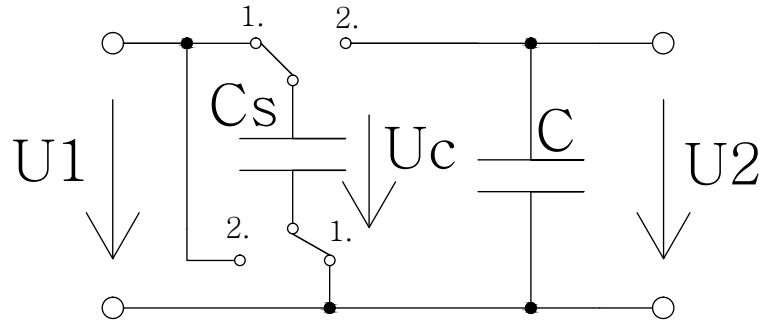
Obrázek 8: Náhrada bipolárního kondenzátoru [2]

3.2 DC/DC měniče

DC/DC měniče jsou používány ke konverzi stejnosměrného napětí. Jsou velmi používané pro malé rozměry, velkou účinnost a nízkou cenu. Dělí se zejména na měniče pro malé a velké výkony. Pro malé výkony lze použít měniče bez indukčnosti pouze s kapacitou. Pro vyšší výkony se musí použít měniče s indukčností. Existují měniče bez transformátoru, které mají výhodu nižší ceny. Měníče s transformátorem mají zase tu výhodu, že mají oddělený vstup a výstup.

3.2.1 Násobič stejnosměrných napětí

Pro násobení stejnosměrného napětí lze využít principu nábojové pumpy. Zde je využíváno přepínání kondenzátoru C_s . Tento zdroj je vhodný pro malý odběr proudu, neboť dodává energii z kapacitoru. Funguje tak, že nejprve se kondenzátor připojí k vstupnímu napětí U_1 a kondenzátor se nabije na velikost napětí vstupu, tedy $U_c = U_1$. Po nabití (na maximální hodnotu) se kondenzátor přepojí do série se vstupním napětím. Tím je dána velikost výstupního napětí $U_2 = U_1 + U_c$. Druhý kondenzátor C slouží k akumulaci energie, která je dodávána do zátěže při nabíjení kondenzátoru C_s . Pro zvýšení odběrného proudu nebo zmenšení zvlnění lze využít dvou nabíjecích kondenzátorů C_s . Ty pracují v inverzním pořadí. Jeden se nabíjí a druhý dodává energii do zátěže. Zapojením více stupňů lze docílit více násobků. Při tom vznikají velké nároky na kondenzátory a výsledná tvrdost zdroje se zmenšuje [1, 4].



Obrázek 9: Násobič stejnosměrných napětí [1]

3.2.2 Zvyšující měnič

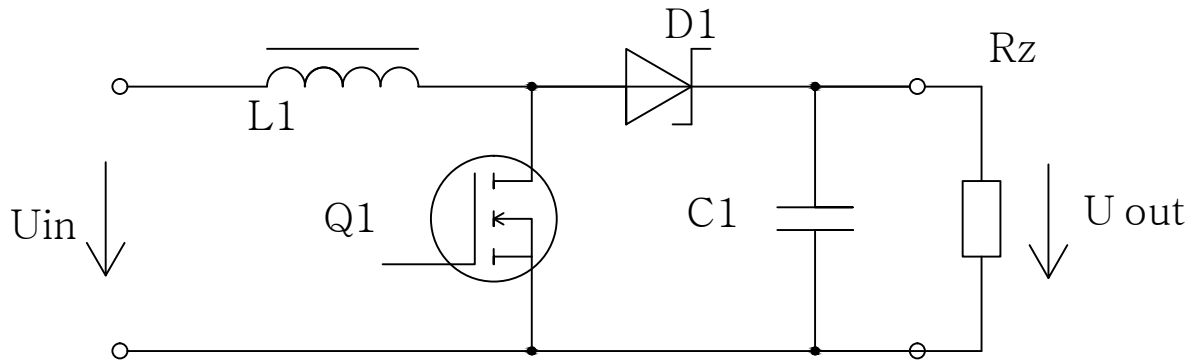
Je jednoduchý měnič používající se pro zvýšení napětí. Má výhodu, že neobsahuje transformátor. Nemá oddělený vstup a výstup. Funguje tak, že se naakumuluje energie na indukčnosti, která je následně dodávána zátěži. Při sepnutí tranzistoru Q1 začne indukčnost, která je nakrátko, procházet proud. Tím se akumuluje energie v magnetickém poli cívky. Tranzistor nesmí zůstat trvale sepnut po odeznění přechodového děje, jinak by nastal zkrat. Při otevření tranzistoru udržuje cívka procházející proud. Polarita napětí cívky se otočí, aby mohla udržet procházející proud. Tím se z cívky stává místo spotřebiče zdroj. Napětí zdroje a cívky se sečte. Tím, že napětí je větší než napětí na zátěži, se otevře dioda D1 a napětí je dodáváno do zdroje. Při tom se nabíjí i kondenzátor C1, který napájí zátěž při sepnutém tranzistoru. Dioda D1 zároveň zamezuje vybíjení kondenzátoru zpět do cívky. Zvlnění ovlivňuje zejména spínací frekvence a velikost kondenzátoru. Spínací frekvence bývá obvykle dosti vysoká, aby velikost indukčnosti a kapacity nemusely být veliké. Pro vyšší frekvence se musí použít Schottkyho dioda kvůli době zotavení.

Velikost napětí na indukčnosti po uzavření tranzistoru Q1:

$$U_{L1} = -L \frac{di_L}{dt}, \quad (18)$$

$$U_{out} = U_{in} + U_{L1}. \quad (19)$$

Kde U_{in} [V] je velikost vstupního napětí, L [H] je indukčnost cívky L1, i_L [A] je velikost proudu cívkou před rozeznutím tranzistoru Q1, U_{out} [V] je výstupní napětí [1, 3].



Obrázek 10: Zvyšující měnič [3]

3.2.3 Jednočinný akumulující měnič

Je akumulující měnič, který pracuje s transformátorem. Jeho výhodou je, že má galvanicky oddělený výstup od vstupu. Měnič se obvykle využívá pro výkony do 250 W. Zapojení je uvedeno na obrázku 11. Lze využívat na snižování a zvyšování napětí. Střída spínání pro snižování bývá pod 50 %, pro zvyšování nad 50 %. Tento měnič funguje na principu akumulace energie v magnetickém obvodu transformátoru, která je poté dodávána do zátěže. Při sepnutém tranzistoru Q1 je vstupní napětí U_{IN} na primární cívce transformátoru U_{L1} . Tím roste proud a roste také magnetický tok, který akumuluje energii v magnetickém obvodu transformátoru. Průchodem magnetického toku magnetickým obvodem se indukují také napětí na sekundární cívce. Díky opačné polaritě začátkům cívek je na sekundární cívce napětí U_{L2} záporné. Dioda zapojená za transformátorem D1 je uzavřená, tudíž do zdroje žádná energie neprotéká. Energie pro zátěž je pokrývána kondenzátorem C1. Energie dodávaná do zátěže je tedy závislá na energii akumulované v magnetickém materiálu při zanedbání rozptylových magnetických toků. Množství energie lze určit z výkonu do zátěže a spínacího kmitočtu.

$$W_{TR} = P_{OUT}/f_s, \quad (20)$$

Kde: W_{TR} [W] je množství energie, které lze do transformátoru během jednoho cyklu akumulovat. P_{OUT} [W/s] je výkon přenášený do zátěže za jeden cyklus. f_s [Hz] je spínací kmitočet tranzistoru Q1.

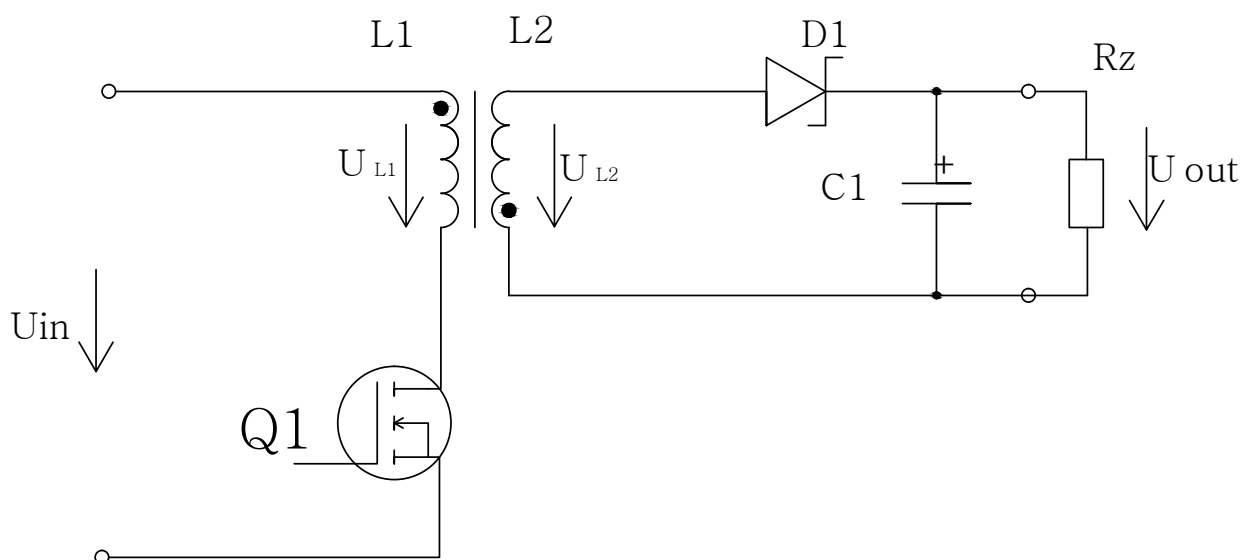
V druhém cyklu se tranzistor Q1 uzavře. Tím se přeruší proud primární cívkou a změní se polarita napětí U_{L1} a U_{L2} . Když velikost napětí U_{L2} překročí velikost napětí na zátěži U_{out} a prahové napětí diody, dioda se otevře. Proud sekundární cívky I_{L2} se začne uzavírat přes zátěž a kondenzátor C1, který se nabíjí. Tím, že se uzavírá proud I_{L2} , se odebrá energie naakumulovaná v transformátoru. Díky odběru sekundární cívkou se omezuje přepětí v primární cívce, které by mohlo prorazit tranzistor Q1. I přes omezení působícím proudem I_{L2} na primární cívce vzniká přepětí. A to v důsledku rozptylových toků primární cívkou,

kteřé se neuzavírají přes sekundární cívku. Tím se indukuje přepětí. Druhým důvodem je, že proud I_{L2} protéká až v době, kdy napětí U_{L2} je vyšší než napětí na zátěži s prahovým napětím diody. Do té doby se na primární cívce indukuje přepětí. Přepětí roste a působí na tranzistor Q1 tím, že by se mohl prorazit přechod mezi kolektorem a emitorem. Z tohoto důvodu se využívá přepěťová ochrana, která chrání tranzistor před průrazem. Velikost průrazného napětí při vypnutém tranzistoru je dána vztahem:

$$U_{L1} = U_{IN} + U_{out} \frac{N_2}{N_1}. \quad (21)$$

Tento vzorec nepočítá s primárními rozptylovými toky a prahové napětí diody.

Kde $N1$ [z] je počet závitů na primární cívce transformátoru, $N2$ [z] je počet závitů na sekundární cívce transformátoru [3].

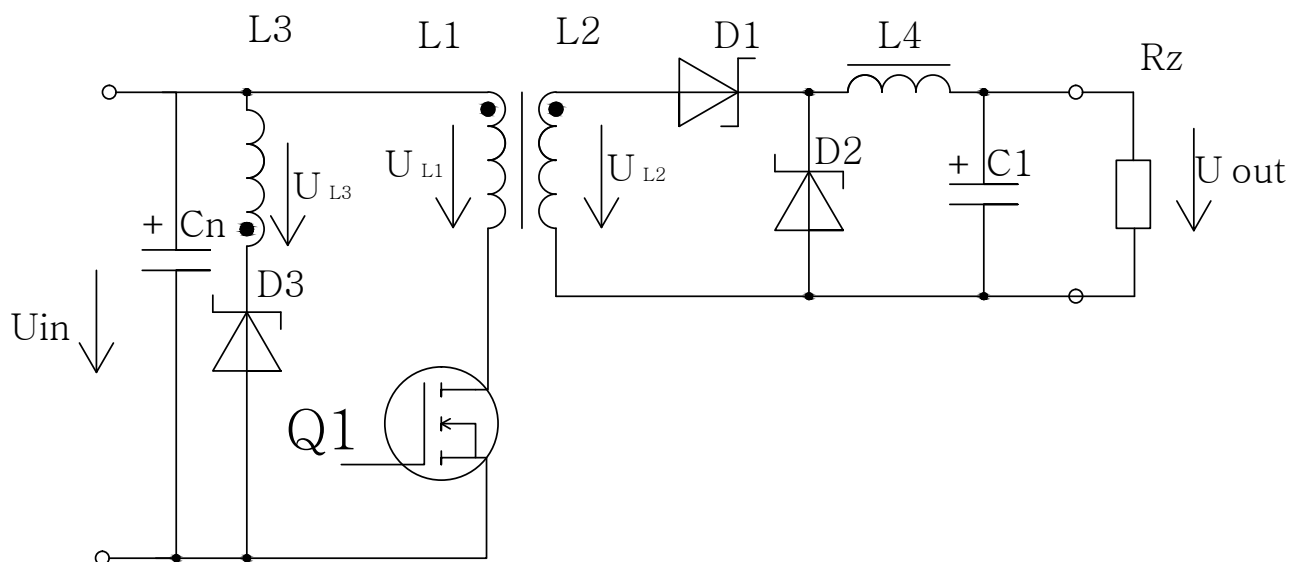


Obrázek 11: Akumulující měnič [3]

3.2.4 Jednočinný propustný měnič

Funguje opačně než akumulující měnič, který pracuje v propustném režimu. Obsahuje transformátor, který galvanicky odděluje vstup a výstup. Tento měnič se nejčastěji používá pro snižování napětí, lze ale také použít pro zvyšování. Je možné ho použít pro vyšší výkony než akumulující měnič, neboť nejsou tak velké nároky akumulace energie v transformátoru. Rozměry transformátor vychází menší než u akumulujícího měniče. Měnič se obvykle využívá pro výkony do 250 W. Funguje tak, že při sepnutí tranzistoru Q1 je na primární cívce transformátoru L1 vstupní napětí U_{IN} , primární cívkou začne protékat proud. Ten vybudí magnetický tok do magnetického obvodu transformátoru. Průchodem magnetického toku sekundární cívkou se indukuje napětí. Začátky vinutí jsou orientovány shodně, proto je napětí U_{L2} kladné. Když napětí překoná napětí U_{out} spolu s prahovým napětím diody D1, dioda se otevře. Začne protékat proud přes cívku L4, který

dále protéká zátěží a zároveň nabíjí kondenzátor C1. Pomocné vinutí transformátoru L3 má opačné pořadí začátků vinutí, tudíž napětí na vinutí neotevře diodu D3 a při sepnutém tranzistoru se neuplatňuje. V druhé fázi se tranzistor Q1 uzavře. Tím se polarita změní na všech vinutích transformátoru, tedy L1, L2, L3. Jelikož napětí sekundární cívky U_{L2} má opačnou polaritu, uzavře se dioda D1 a v této fázi není dodávána žádná energie do zátěže. Spotřeba zátěže je hrazena z kondenzátoru C1 a cívky L4. Cívka L2 chce zachovat dosavadní proud, proto se otáčí polarita napětí na ní, z tohoto důvodu se chová ne jako spotřebič, ale jako zdroj. Tím se otevře dioda D2 a proud prochází skrz zátěž. Na kondenzátoru se mění polarita proudu a také se chová jako zdroj a dodává energii do zátěže, neboť ze sekundárního vinutí není odebírán žádný proud. Dioda D1 nevede proud během celé doby sepnutí tranzistoru Q1, proto v transformátoru zůstane naakumulovaná energie. Vznikalo by přepětí, které by mohlo prorazit tranzistor Q1 nebo diodu D1. Pro ochranu obvodu je možné použít přepětíovou ochranu. Bohužel všechna energie uložená v transformátoru by byla zmařena. Tím by výrazně klesala účinnost, neboť v každém cyklu by energie byla mařena. Proto se transformátor opatří třetím vinutím L3. Vinutí L3 má opačně orientovaný začátek vinutí. Tím se v něm indukuje kladné napětí, které otevře diodu D3. Proud z cívky se uzavře přes filtrační kondenzátor Cn. Energie z kondenzátoru se opět využije v dalším cyklu při sepnutí tranzistoru Q1. Počet závitů L3 obvykle bývá jako u primárního vinutí. Musí platit, že napětí indukované v cívce L3 bylo vyšší než vstupní napájení U_{IN} [3].

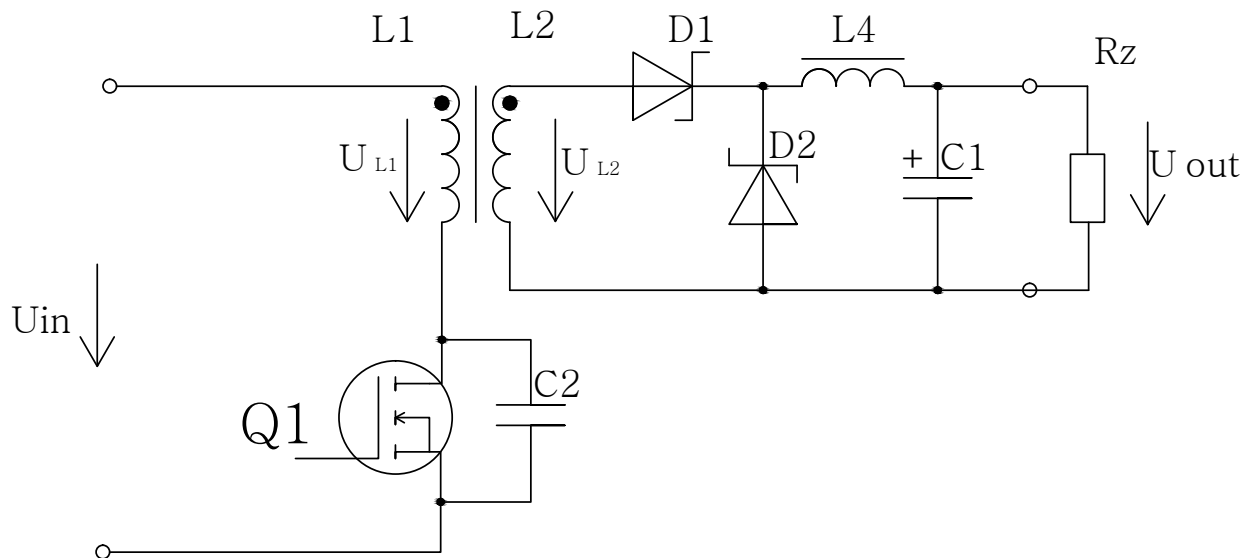


Obrázek 12: Propustný měnič [3]

3.2.5 Rezonanční měnič

Vychází z propustného měniče. Měnič pracuje s vyšší účinností a menším rušením na okolí. Využívá se jen pro malé výkony do 40 W. Modifikace spočívá v tom, že k spína-

címu tranzistoru Q1 je připojen paralelně kondenzátor C2. Velikost kondenzátoru se volí s ohledem na spínací kmitočet tranzistoru. Velikost se zvolí tak, aby spolu s parazitní kapacitou tranzistoru a indukčností cívky tvořily rezonanční obvod. [3].

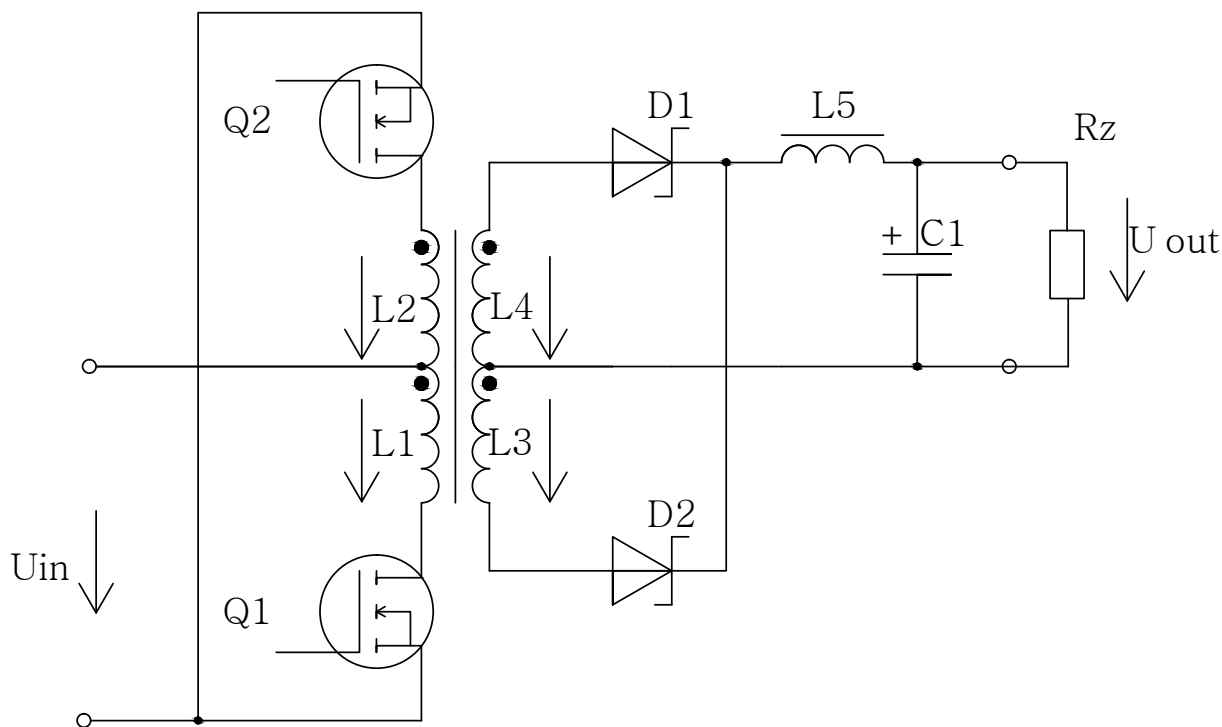


Obrázek 13: Rezonanční měnič [3]

3.2.6 Dvojitý měnič v zapojení push-pull

Výhoda dvojitýho měniče proti jednočinnému je v tom, že nedochází ke stejnosměrnému sycení jádra transformátoru. Magnetický obvod transformátoru je sycen střídavě. Díky předpokladu, že jádro je magnetizováno střídavě, je využita celá plocha hysterezní smyčky magnetického obvodu. Základní zapojení push-pull vychází ze dvou jednočinných měničů. Jsou zapojené paralelně a pracují inverzně. Zapojení je symetrické. Polarita cívek je u všech shodná. Počet závitů primárních cívek N1 a N2 jsou shodné, stejně jako počet závitů sekundárních cívek N3 a N4, které jsou spojeny magnetickým obvodem transformátoru. V prvním cyklu je sepnut tranzistor Q1 a Q2 je rozepnut. Proud začne procházet primární cívkou N1. Tím se vytvoří magnetický tok v magnetickém obvodě. Všechna indukovaná napětí na jednotlivých cívkách jsou ve smyslu šipek kladné. Uzavřený tranzistor Q2 je namáhán indukovaným napětím na cívce L2 a napájecího napětí U_{IN} . Na sekundární straně transformátoru je dioda D2 uzavřená. Proud z cívky L3 se nikde neuzavírá. Na diodu D2 v závěrném stavu působí součet napětí ze sekundárních cívek L3 a L4. Jestliže velikost napětí na sekundární cívce vzroste nad velikost napětí U_{OUT} s prahovým napětím diody D1, tak se dioda otevře. Proud začne protékat cívkou L5, kde se ukládá energie do magnetického pole. Prochází zátěží a zároveň kondenzátorem, který se nabíjí. Než nastane druhý cyklus, musí být prodleva mezi rozepnutím tranzistoru Q1 a sepnutím tranzistoru Q2. Jinak by se mohlo stát, že než se Q1 uzavře, tak se sepne Q2. Tím by nastal zkrat. V druhém cyklu je otevřen tranzistor Q2 a proud prochází primární cívkou

L2. Závěrné napětí na Q1 působí stejně jako v prvním cyklu na Q2. Na sekundární straně může procházet pouze proud přes diodu D2. Závěrné napětí na D1 je stejné jako v prvním cyklu na D2. Z toho plyne, že proud je zátěži dodáván v obou cyklech mimo ochrannou dobu mezi cykly. Z toho je patrné, že výstupní zvlnění je oproti jednočinnému měniči menší. Proto nejsou kladené tak velké požadavky na filtrační cívku a kondenzátor. Z tohoto důvodu se dvojitě zapojení hodí pro větší výkony [3].

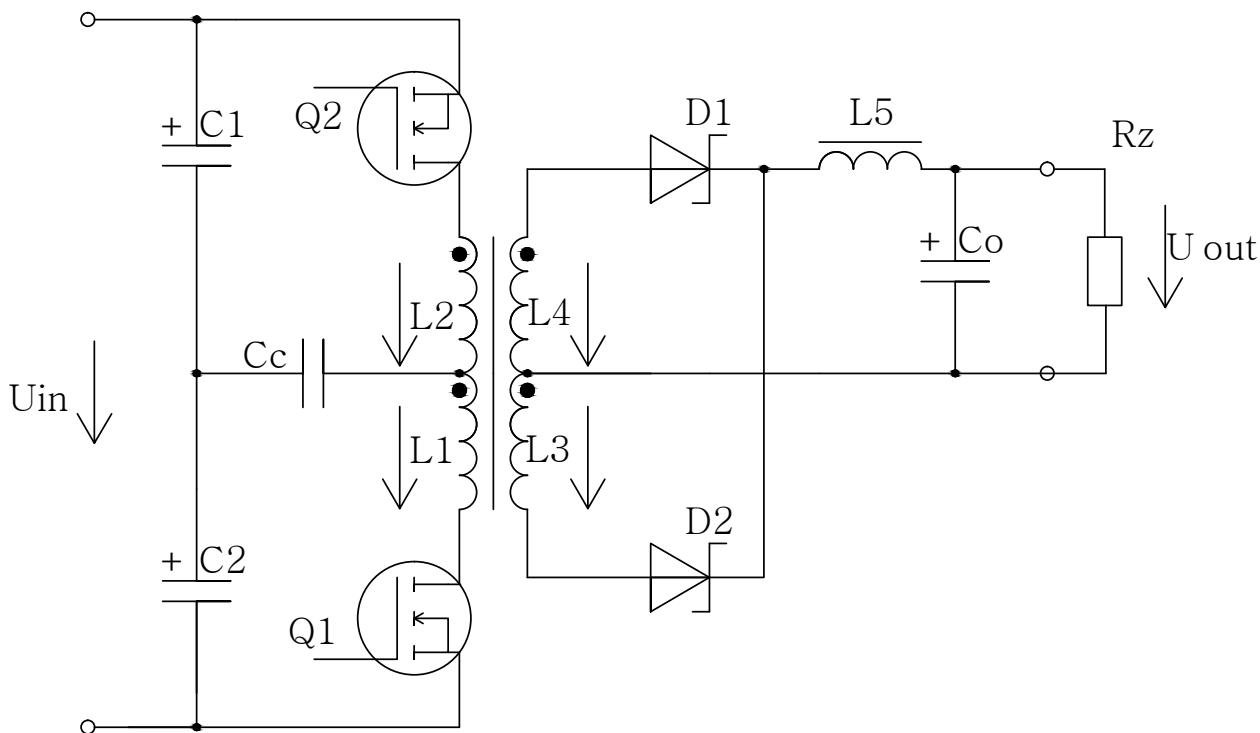


Obrázek 14: Dvojitě zapojení push-pull [3]

3.2.7 Dvojitě zapojení polomost

Měnič je odvozen z dvojitě zapojení. Obvody na sekundární straně měniče jsou shodné jako u předchozího dvoucestného měniče. Na sekundární straně je obvod tvořený dvěma spínacími tranzistory Q1 Q2, nabíjecími a vybíjecími kondenzátory C1 C2, dále z kondenzátoru Cc, který musí být bipolární, neboť se na něm střídají polarity napětí. Kapacita kondenzátoru Cn musí být velká, aby nevznikaly ztráty při přebíjení. Oproti dvojitě zapojení je jeho výhodou v tom, že proudové impulzy odebírané ze zdroje U_{in} jsou pokrývány z kondenzátorů C1 a C2. Měnič lze zapojit dvěma způsoby: buď s dvěma primárními cívkami transformátoru nebo s jednou. První případ s dvěma primárními cívkami je na obrázku 14. Tento měnič pracuje tak, že v prvním cyklu sepne tranzistor Q1 a proud začne procházet cívkou transformátoru L1. Proud procházející cívkou je tvořen proudem z nabitěho kondenzátoru C1, který byl nabit v předchozím cyklu, a proudem dodávaným z napájecího zdroje. Proud z napájecího zdroje se uzavírá přes kondenzátor C2 a ten se nabíjí. Na konci tohoto cyklu je tedy kondenzátor C1 skoro vybitý a C2 skoro nabitý. Na

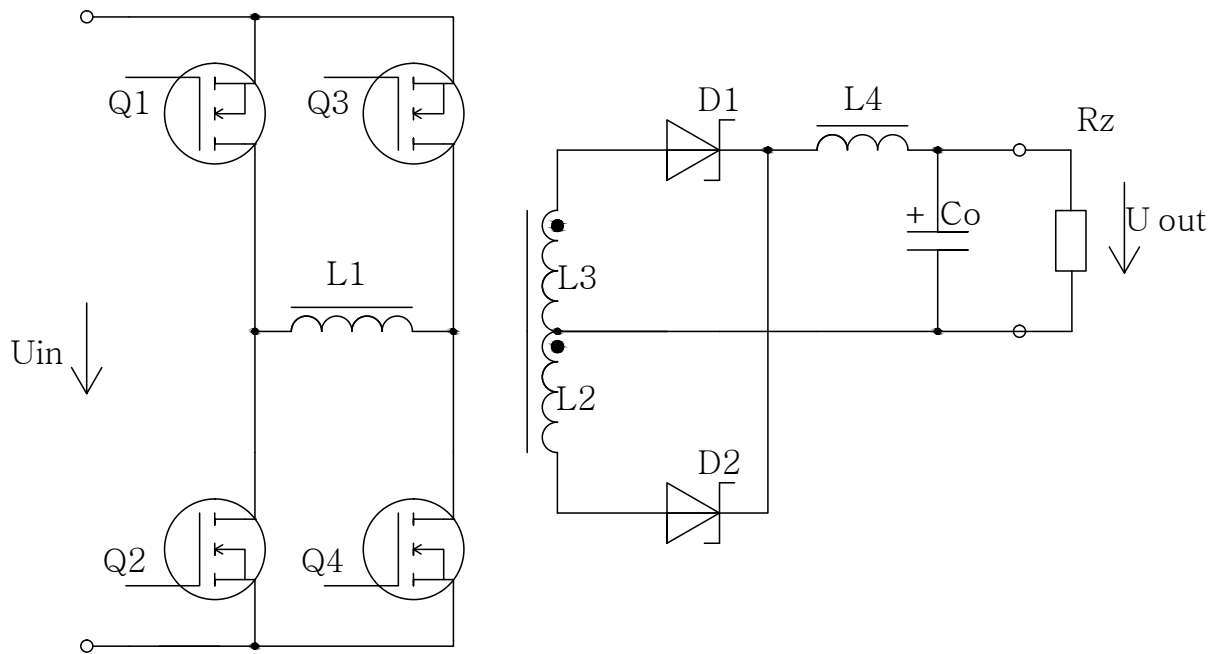
sekundární straně prochází proud diodou D1 do zátěže stejně jako v případě dvojcestného měniče. Mezi druhým cyklem musí být krátká prodleva, aby nenastalo sepnutí obou tranzistorů. Po uzavření tranzistoru Q1 se otevírá Q2. Vinutím L2 začne protékat proud. Proud cívku L2 je opět tvořen z nabitého kondenzátoru a nabíjecího zdroje. Tím se C2 začne vybíjet a C1 opět nabíjet. Proud do zátěže prochází přes diodu D2 [3].



Obrázek 15: Dvojčinný měnič v zapojení polomost s dvěma primárními vinutími [3]

3.2.8 Dvojčinný měnič v zapojení plný most

Zapojení plný most se od zapojení polomostu liší pouze tím, že kondenzátory C1 a C2 jsou nahrazeny dvěma tranzistory. Tento typ měniče je vhodný pro výkony nad 500W. Vysoký výkon je zajištěn přenosem energie v obou cyklech a také tím, že celé vstupní napětí je na cívce L1 pouze bez úbytků napětí na dvou sepnutých tranzistorech. Vstupní spínací tranzistory Q1-Q4 fungují jako střídač napětí. Vždy je sepnuta dvojice tranzistorů Q1, Q4 nebo Q3, Q2. Mezi přepnutími z jednoho stavu do druhého musí být mrtvý čas, aby nenastal zkrat. Na primární cívce transformátoru L1 se v důsledku spínání tranzistoru mění polarita napětí. Na sekundární straně se indukuje střídavé napětí, které je následně usměrněno stejně jako u předchozích zapojení [3].



Obrázek 16: Dvojitý měnič v zapojení plný most [3]

4 Praktická úloha

Úkolem bylo modelování zdroje pro napájení HPGE dektoru. Potřebné napětí se pohybuje okolo 3 000 V. Zjednodušeně si lze HPGE detektor pro zdroj napájení představit jako závěrně polarizovanou diodu. Výsledné chování zátěže je možné považovat jako paralelní spojení svodového odporu a kapacity PN přechodu. Pro zjednodušení simulace bude HPGE detektor považován pouze za odporovou zátěž. Při proudovém odběru 1 mA, tedy jako zátěž o velikosti 3 M Ω . Simulace jsou provedeny v nástroji LTspice IV. Hlavním důvodem pro výběr byla dostupnost licence. Součástky (rezistor, indukčnost, tranzistor, kondenzátory, diody) jsou uvažovány jako ideální. Byly však sledovány mezní parametry reálných dostupných součástek a porovnány s výsledky simulací.

4.1 Kaskádní násobič

Pro získání vyššího napětí s nízkým odběrem se zdá nejjednodušší využití kaskádního násobiče. Při napájení násobiče ze sítě není velikost vstupního napětí konstatní. Povolená odchylka je $\pm 10\%$. Efektivní hodnota v síti je 230 V. Při počítání s nezatíženým násobičem je velikost střední hodnoty napětí na základním stupni.

Velikost maximální hodnoty pro sinusová napětí lze spočítat jako:

$$U_0 = \sqrt{2} \cdot U_{ef} \doteq 325,3 \text{ V.} \quad (22)$$

Potřebný počet stupňů násobiče tedy lze určit jako:

$$n = \frac{U_{out}}{U_0} = \frac{3000}{325,3} \doteq 9,2. \quad (23)$$

Při zatížení se projeví ztráty. Na diodách je úbytek prahového napětí a také omezená velikost kapacity kondenzátorů. Proto počet stupňů lze zvolit 10. Nutno si uvědomit, že při povolené odchylce vstupního napětí se výstupní napětí bude lišit také o 10%. Proto u nezatíženého násobiče lze očekávat výstupní napětí v rozmezí:

$$U_{out} = n U_0 \pm 10\% = 10 * 325,3 \pm 10\% = 3253 \pm 325,3 = 2927,7 - 3578,3 \text{ V.} \quad (24)$$

Pro zjednodušení budeme uvažovat, že všechny diody budou nadimenzovány na stejnou velikost závěrného napětí:

$$U_{zv} = 2 \cdot U_0 \doteq 650 \text{ V.} \quad (25)$$

Proudové namáhání lze uvažovat jako střední hodnotu odběru. Vzhledem k tomu, že nabíjecí proudová špička má větší hodnotu a také, že vlivem ztrát bude procházet větší proud. Propustné proudové namáhání není u takto malých proudů problém. Proto lze

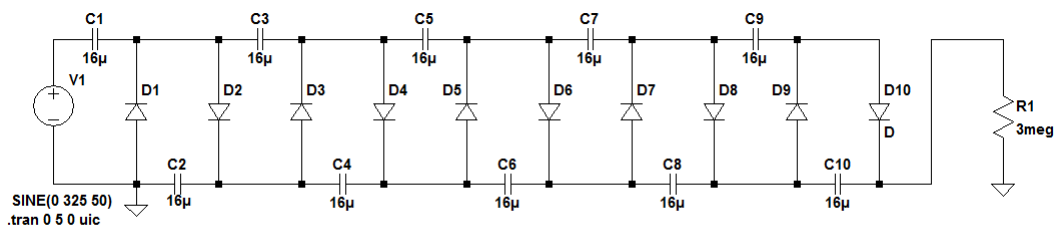
volit diodu s dostatečnou rezervou. Velikost kapacity lze určit:

$$C > \frac{2 \cdot n(n+2)I}{U_0 \cdot f}, \quad (26)$$

$$C > \frac{2 \cdot 10 \cdot (10+2) \cdot 0,001}{325 \cdot 50},$$

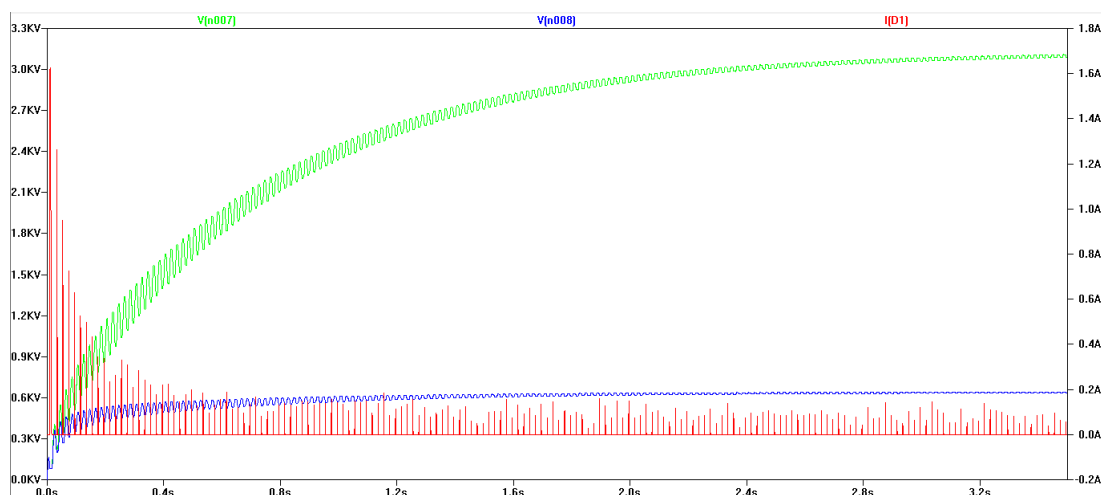
$$C > 15\mu F.$$

Napětí zatěžující kondenzátor je shodné se závěrným napětím diod, tedy 650 V. Vzhledem k tomu, že velikost kapacity vychází poměrně velká, je potřeba využít elektrolytický kondenzátor. Elektrolytické kondenzátory se vyrábí pro napětí do 450 V, proto bude potřeba použít dva kondenzátory do série. Na každém z nich bude poloviční hodnota, tedy 325 V. Bohužel výsledná kapacita dvou seriově řazených kondenzátorů je poloviční. Proto kapacita C bude muset mít velikost $33\mu F$.



Obrázek 17: Simulační schéma kaskádního násobiče

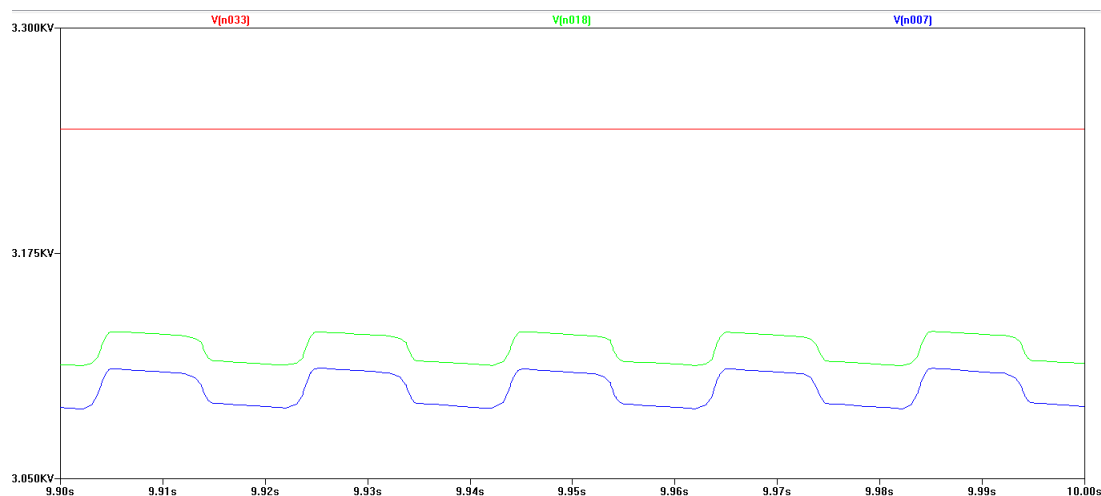
Pro simulaci je využita přechodová analýza. Z průběhu výstupního napětí je patrné, že než se hodnota napětí přiblíží na požadovanou hodnotu 3 kV, trvá to 2,5 s. To je způsobeno postupným nabíjením kondenzátorů v jednotlivých periodách. Pro rychlejší nárůst napětí by musela být použita vyšší frekvence. Na diodách je velikost závěrného napětí přibližně 650 V. Na stejnou velikost jsou nabity i kondenzátory. Při sepnutí nastává proudová špička z důvodu nabíjení kondenzátorů, snížení špičkového proudu by mohlo být omezeno odporem vloženým před násobič. To by ale znamenalo další nechtěný úbytek a velikost výstupního napětí by se snížila.



Obrázek 18: Průběhy se zátěží

Obrázek 18 ukazuje průběhy: V(n007) je výstupní napětí při zátěži $3\text{ M}\Omega$, V(n008) je napětí působící v závěrném směru na diodu D2, I(D1) je proud diodou D1.

Na obrázku 19 je vykreslen průběh výstupního napětí v závislosti na zatížení. Z toho je patrné, že nezatížený násobič se ustálí na konstantním napětí. Při zatížení se výstupní napětí nikdy neustálí. Napětí je zvlněné a zároveň jeho velikost je nižší.



Obrázek 19: Vliv zátěže na výstupní napětí

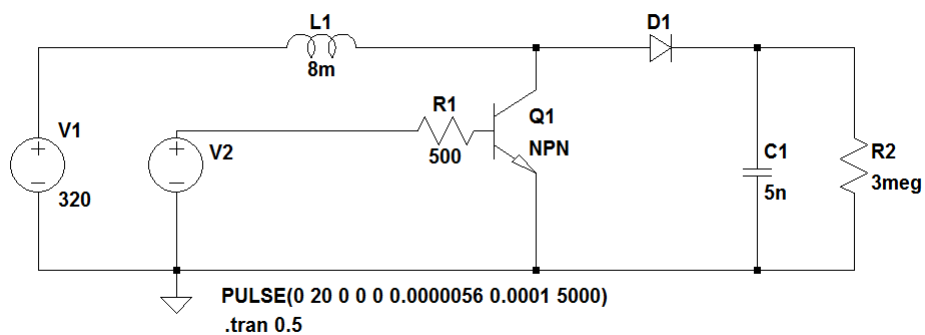
Výsledky simulací pro různé zátěže jsou uvedeny na obrázku 19, kde: V(n033) je výstupní napětí bez zátěže, V(n018) je výstupní napětí při zátěži $3\text{ M}\Omega$, V(n007) je výstupní napětí při zátěži $2,5\text{ M}\Omega$

Pro konstrukci lze využít 10 křemíkových diod odolných v závěrném směru 650 V . Protékající proud je nejvyšší u první diody D1, kde jeho hodnota při sepnutí skokově dosahuje velikosti $1,6\text{ A}$. Dioda vede pouze v polovině periody, proto je střední hodnota nižší než 1 A . Vzhledem k napájecí frekvenci doba zotavení hraje malou roli. Proto je možné použít diodu 1N4007, která je vyrobena pro závěrné napětí 1000 V , propustný proud 1 A a prahové napětí $1,1\text{ V}$. Kondenzátorů je potřeba 20 ks . Jeden musí odolávat 325 V .

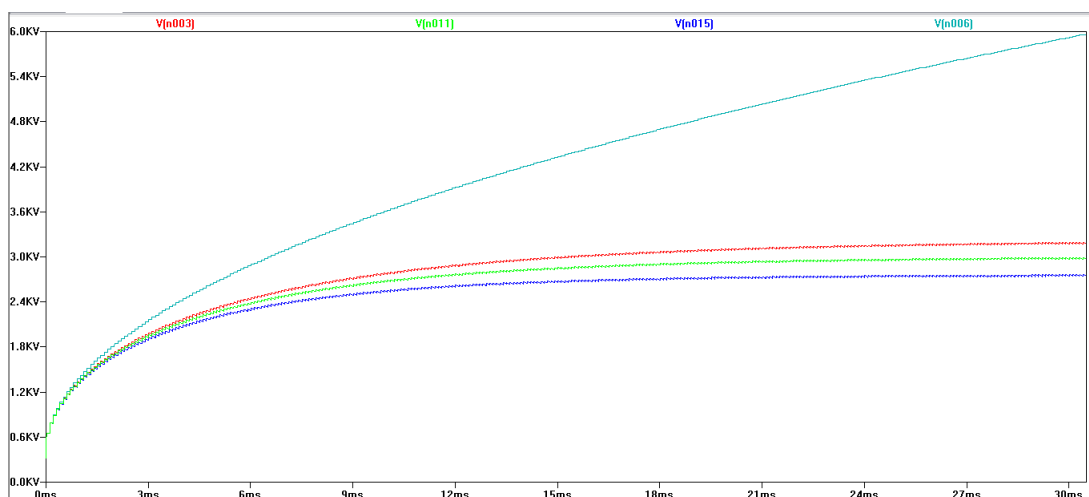
Vzhledem k tomu, že napětí na dvojici kondenzátorů nemusí být rozděleno rovnoměrně, je vhodné zvolit kondenzátor s větší hodnotou. Těmto požadavkům odpovídá elektrolytický kondenzátor E33M/400V-HB. Velikost kapacity $33 \mu\text{F}$ a napětí 400 V. Výsledná cena použitých součástek je přibližně 270 Kč [8, 9].

4.2 Zvyšující měnič

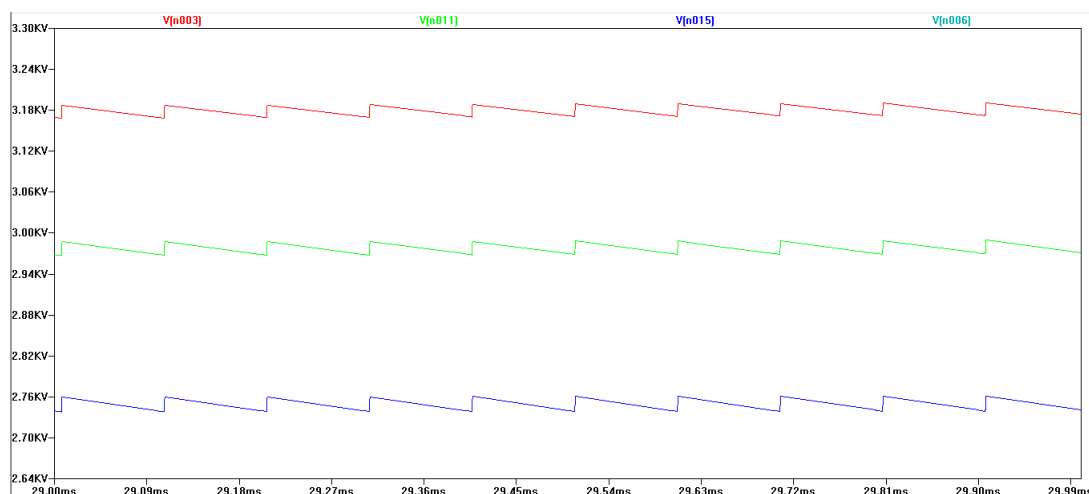
Napájení zvyšujícího měniče je provedeno pomocí usměrněného síťového napětí, které bude zajištěno můstkovým usměrňovačem s dostatečnou kapacitou pro udržení malého zvlnění. Vstupní napětí do zvyšujícího měniče bude tedy 325 V. V simulaci je použit přímo zdroj stejnosměrného napětí a neprojeví se tedy zvlnění usměrňovače. Řízení spínání impulzů pro tranzistor je v simulaci nahrazeno zdrojem obdélníkového průběhu. V reálném zapojení by bylo vhodné použití řízení se zpětnou vazbou. Velikost součástek je volena náhodně, neboť dioda D1 by při spínacím kmitočtu 10 kHz měla dlouhou dobu zotavení a bylo by nutno použít Schottkyho diodu. Ta však není běžně dostupná pro závěrné napětí o velikosti 3 kV. Stejný problém nastává u spínacího tranzistoru Q1, který při uzavřeném stavu je namáhán rozdílem výstupního a vstupního napětí. Vzhledem k tomu, že tyto součástky pro tak vysoké napětí nejsou běžně dostupné, je simulace uvažována s ideálními součástkami. Pro velikost indukčnosti cívky 8 mH je zvolena spínací frekvence 10 kHz s časem sepnutí $5,6 \mu\text{s}$.



Obrázek 20: Simulační schéma zvyšujícího měniče



Obrázek 21: Výstupní průběh napětí



Obrázek 22: Výstupní průběh napětí zoom

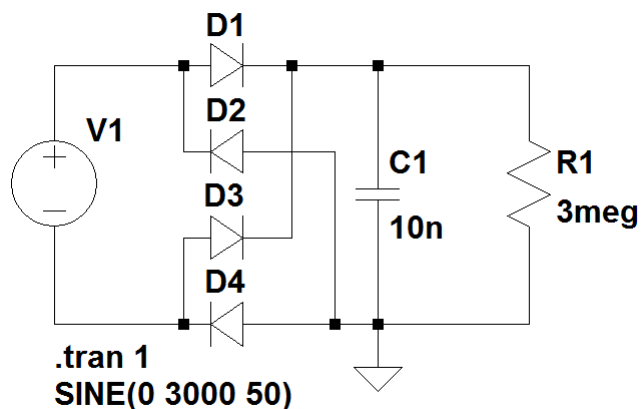
Obrázek 21 a 22 ukazuje: V(n003) výstupní napětí se zátěží $3,5 \text{ M}\Omega$, V(n011) výstupní napětí se zátěží $3 \text{ M}\Omega$, V(n015) výstupní napětí se zátěží $2,5 \text{ M}\Omega$, V(n006) výstupní napětí bez zátěže.

4.3 Transformátor s usměřňovačem

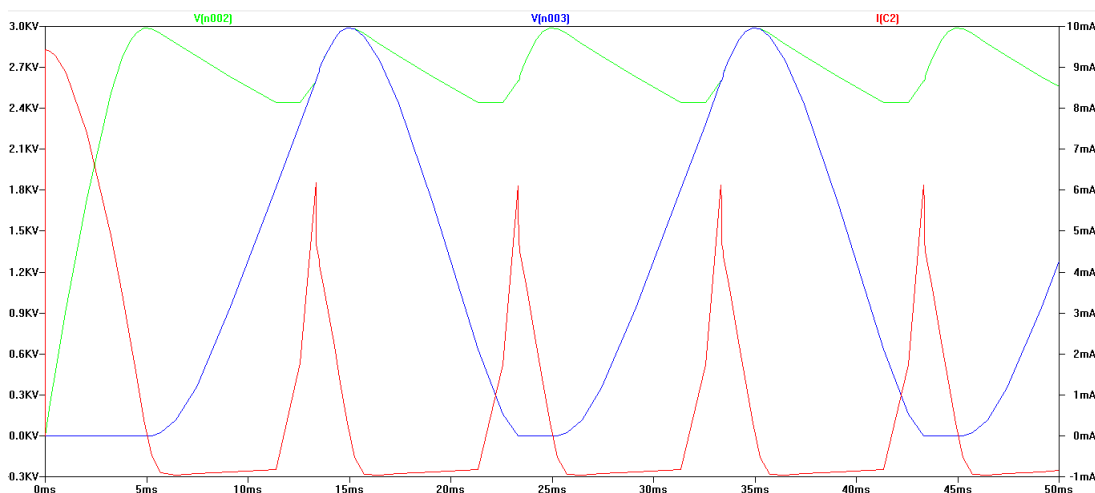
Pro získání stejnosměrného napětí o velikosti 3 kV, lze také využít transformátor. Následné transformované napětí je usměrněno pomocí usměřňovače. U transformátoru nastává problém, protože se běžně nevyrábí s potřebným převodem. Transformátor je napájen ze sítě 230 V. Velikost výstupního napětí transformátoru, které je následně usměrněno, je 3000 V maximální hodnoty. Přepočteno na efektivní hodnotu U_2 :

$$U_2 = \frac{3000}{\sqrt{2}} \doteq 2120V. \quad (27)$$

Vzhledem k tomu, že napětí má vysokou hodnotu, je problém s filtračním kondenzátorem, který musí být odolný 3000 V. Jelikož kondenzátory v této napěťové hladině mají malou kapacitu, je vhodné využít můstkového usměrňovače. Dioda musí být odolná hodnotě výstupního napětí, tedy 3000 V.



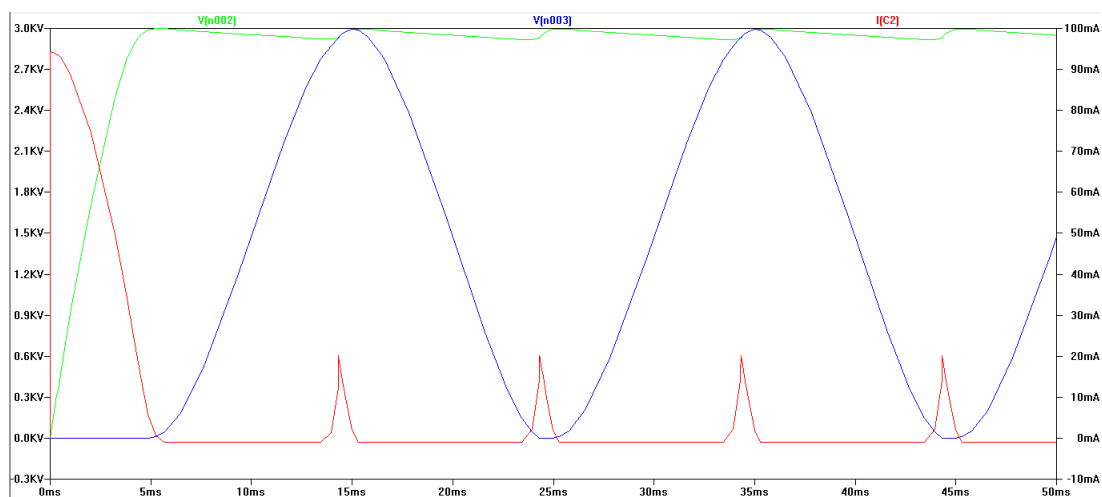
Obrázek 23: Simulační schéma usměrňovače



Obrázek 24: Průběhy napětí a proudu v usměrňovači

Obrázek 24 ukazuje: $V(n002)$ výstupní napětí se zátěží $3\text{ M}\Omega$, $V(n003)$ napětí na diodě D4, $I(C1)$ proud na kondenzátoru C1.

Z výstupních průběhů je patrné, že zvlnění je velmi velké, pohybuje se okolo 200 V. Pro snížení zvlnění lze použít vyšší kapacitu. Běžně nabízené kondenzátory na 3000 V však vyšší kapacitu nemají. V tomto zapojení usměrňovače lze využít diodu GP02-40, která odolává v závěrném směru 4000 V a její maximální proud je 0,25 A. Kondenzátor je keramický KER 10N/3kV RM10 s napětím 3000 V a kapacitou 10 nF. V následujícím obrázku 25 je použito deset kondenzátorů KER 10N/3kV RM10, které zabezpečí kapacitu 100 nF.



Obrázek 25: Průběhy napětí a proudu v usměrňovači s vyšší kapacitou

Obrázek 25 ukazuje: V(n002) výstupní napětí s zátěží $3\text{ M}\Omega$, V(n003) napětí na diodě D4, I(C1) proud na na kondenzátorech.

Zde je patrné, že zvlnění je výrazně nižší a že toto zapojení je již použitelné. Cena není přesně specifikovatelná vzhledem k navíjení transformátoru. Cena samotných součástek bez transformátoru se pohybuje okolo 70 Kč [10, 11].

5 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo prostudovat a namodelovat zdroj vysokého napětí pro napájení HPGE detektoru. V druhé části jsou popsány teoretické možnosti řešení zdroje. V třetí části jsou návrhy obvodů spolu se stanovením ceny jejich realizace.

V této práci byly namodelovány tři druhy měničů pro získání stejnosměrného napětí. Při modelování zvyšovacího měniče bylo zjištěno, že z důvodu omezení parametrů součástek, zejména rychlé usměrňovací diody a tranzistoru, by tento zdroj byl obtížně realizovatelný. Lépe se jeví spojení transformátoru s usměrňovačem. Zde vzniká problém s transformátorem, jelikož transformátor s takovým převodem se běžně neprodává. Bylo by potřeba navrhnout transformátor a vyrobit ho na míru. Pro výrobu jednoho kusu transformátoru by byla cena příliš vysoká. Jako nejvhodnější zapojení se jeví kaskádní násobič. V tomto zapojení nastává problém pouze s kondenzátory. Potřeba velké kapacity se rozchází s požadavkem na napětí. Proto zde musí být použity vždy dva seriově spojené kondenzátory, aby nebyly provozovány při vyšším napětí než udává výrobce. Výsledná cena je ovlivněna velkým počtem kondenzátorů.

Reference

- [1] BRTNÍK, Bohumil. Základní elektronické obvody. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2011, 155 s. ISBN 978-80-7300-408-8.
- [2] KREJČIŘÍK, Alexandr. Lineární napájecí zdroje. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2001, 136 s. ISBN 80-730-0002-4.
- [3] KREJČIŘÍK, Alexandr. DC/DC měniče. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2001, 111 s. ISBN 80-730-0045-8.
- [4] HUMLHANS, Jan. Nábojové pumpy: funkce, přehled a použití. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 191 s. ISBN 80-730-0046-6.
- [5] LÁNÍČEK, Robert. Elektronika: Obvody. Součástky. Děje. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1998, 479 s. ISBN 80-860-5625-2.
- [6] HÄBERLE, Heinz. Průmyslová elektronika a informační technologie: Obvody. Součástky. Děje. Vyd. 1. Praha: Europa-Sobotáles, 2003, 719 s. ISBN 80-867-0604-4.
- [7] PINKER, Jiří a Václav KOUCKÝ. Analogové elektronické systémy. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010, 2 sv. (142 s., s. 143-307, 6, 15 s.). ISBN 978-80-7043-917-3.
- [8] GES ELECTRONICS. 1N4001 thru 1N4007 Datasheet [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/sheets/1/1n40xx.pdf>
- [9] GM ELECTRONIC. ECR SERIES Datasheet [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/img/cache/doc/123/416/ce-33u-400v-hit-ecr-16x26-rm7-5-bulk-datasheet-1.pdf>
- [10] GM ELECTRONIC. GP02-20 thru GP02-40 Datasheet [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/img/cache/doc/220/038/gp02-40-datasheet-1.pdf>
- [11] GES ELECTRONICS. Ceramic disc capacitor 3kV Datasheet [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: http://www.ges.cz/sheets/c/cck3k_xx.pdf
- [12] LTspice. [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~lsroubov/TE1/LTspice_navod.pdf

A Příloha

A.1 Kaskádní násobič

```
$PACKAGES voltage! SINE(0 325 50); V1
  cap! 16μ; C1
  cap! 16μ; C2
  cap! 16μ; C3
  cap! 16μ; C4
  diode! D; D2
  diode! D; D4
  cap! 16μ; C5
  diode! D; D5
  cap! 16μ; C6
  diode! D; D6
  cap! 16μ; C7
  cap! 16μ; C8
  diode! D; D8
  cap! 16μ; C9
  diode! D; D9
  cap! 16μ; C10
  diode! D; D10
  diode! D; D1
  res! 3meg; R1
  diode! D; D7
  diode! D; D3
$NETS
N001; V1.1 C1.2 0; V1.2 C2.2 D1.1 R1.2
N002; C1.1 C3.2 D2.1 D1.2
N003; C3.1 D4.1 C5.2 D3.2
N004; C5.1 D5.2 D6.1 C7.2
N005; C7.1 D8.1 C9.2 D7.2
N006; C9.1 D9.2 D10.1
N007; C10.1 D10.2 R1.1
N008; C2.1 C4.2 D2.2 D3.1
N009; C4.1 D4.2 D5.1 C6.2
N010; C6.1 D6.2 C8.2 D7.1
N011; C8.1 D8.2 D9.1 C10.2
$END
```

A.2 Zvyšovací měnič

```
$PACKAGES voltage! 320; V1
  voltage! PULSE(0 20 0 0 0 0.0000056 0.0001 5000); V2
  ind! 8m; L1
  diode! D; D1
  cap! 5n; C1
  res! 3meg; R2
  npn! NPN; Q1
  res! 500; R1
$NETS
N001; V1.1 L1.2 0; V1.2 V2.2 C1.2 R2.2,
Q1.3
N004; V2.1 R1.1
N002; L1.1 D1.1 Q1.1
N003; D1.2 C1.1 R2.1
P001; Q1.2 R1.2
$END
```

A.3 Usměrňovač

```
$PACKAGES voltage! SINE(0 3000 50); V1
  diode! D; D1
  cap! 100n; C1
  diode! D; D2
  diode! D; D3
  diode! D; D4
  res! 3meg; R1
$NETS
N001; V1.1 D1.1 D2.2
N003; V1.2 D3.1 D4.2
N002; D1.2 C1.1 D3.2 R1.1 0; C1.2 D2.1 D4.1 R1.2
$END
```