VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

GENERÁTOR NAPĚŤOVÝCH IMPULSŮ VYSOKÉ ÚROVNĚ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE LEOŠ MAREK
AUTHOR

BRNO 2011

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

GENERÁTOR NAPĚŤOVÝCH IMPULSŮ VYSOKÉ ÚROVNĚ

THE GENERATOR OF HIGH LEVEL VOLTAGE IMPULSE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE LEOŠ MAREK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. RADIM KADLEC
SUPERVISOR

BRNO 2011

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Leoš Marek

Bytem: Petrovice 77, Lanškroun 563 01

Narozen/a (datum a místo): 16.10. 1987, Ústí nad Orlicí

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Technická 3058/10, 616 00, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

(dále jen „nabyvatel“)

Článek 1
Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
   - □ disertační práce
   - □ diplomová práce
   - □ bakalářská práce
   - □ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

   (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Generátor napěťových impulsů vysoké úrovně
Vedoucí/ školitel VŠKP:	Ing. Radim Kadlec
Ústav:	Ústav radioelektroniky
Datum obhajoby VŠKP:	……

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- □ tištěné formě – počet exemplářů 2
- □ elektronické formě – počet exemplářů 1

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2
Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
   - □ ihned po uzavření této smlouvy
   - □ 1 rok po uzavření této smlouvy
   - □ 3 roky po uzavření této smlouvy
   - □ 5 let po uzavření této smlouvy
   - □ 10 let po uzavření této smlouvy

   (z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3
Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: …….

…….. ……
Nabyvatel Autor

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Leoš Marek ***ID:*** 109696
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Generátor napěťových impulsů vysoké úrovně

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rozbor problematiky generování napěťových impulsů s krátkou dobou trvání. Zabývejte se různými principiálními obvodovými zapojeními a kvalitativním popisem generovaných impulsů.

Diskutujte možnosti externího řízení. Realizujte vybranou variantu impulsního generátoru. Experimentálně ověřte jeho vlastnosti a diskutujte výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] HIDENORI A., NAOYOKI S., SCHOENBACH K. Pulsed Power Science and Technology [online]. Kumamoto University. Dostupný z WWW: <http://pps.coe.kumamoto-u.ac.jp/streaming/PulsedPower/PulsedPower.htm>

[2] DREXLER, P. Metody měření ultrakrátkých neperiodických elektromagnetických impulsů. Disertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007

Termín zadání: 7.2.2011 ***Termín odevzdání:*** 27.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Radim Kadlec

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou generování napěťových impulsů vysoké úrovně. V rámci práce jsou nejprve popsány tvary jednotlivých impulsů, dále je znázorněno blokové schéma generátoru napěťových impulsů a v teoretickém rozboru jsou teoreticky rozebrány možnosti řešení jednotlivých bloků.

V hlavní části práce je podrobně popsána realizace vybraného vysokonapěťového zdroje. Tato část obsahuje schémata, návrh desek plošných spojů, osazovací výkresy, konstrukci ostatních částí zdroje a oživení a měření.

Klíčová slova

Vysokonapěťový zdroj, impuls, úschova energie, jiskřiště.

Abstract

This paper deals with generate of a high level voltage pulse. The thesis describes the shape of these pulses. There are the block diagram of the voltage pulse generator. The possibility of design of individual blocks are discussed in the theoretical analysis.

In the main part, detailed implementation of a selected hight voltage source is described. This part includes diagrams, printed circuit board designs, printed circuit assembly drawings, construction of other parts of the source and recovery and measurement.

Keywords

High level voltage source, pulse, storage of energy, spark gap.

MAREK, L. Generátor napěťových impulsů vysoké úrovně: Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radim Kadlec.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma Generátor napěťových impulsů vysoké úrovně jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor bakalářské práce na téma Generátor napěťových impulsů vysoké úrovně dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne …… .....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Radimu Kadlecovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce, která byla řešena za podpory projektu Institut experimentálních technologií 2 (viz příloha č.1)

V Brně dne …… .....

podpis autora

OBSAH

1. Úvod ..... - 1 -
2. Teoretický rozbor ..... - 2 -
2.1 Tvary impulsů ..... - 2 -
2.2 Zdroj napětí ..... - 3 -
2.2.1 Zdroje klasické koncepce ..... - 4 -
2.2.2 Spínané zdroje ..... - 4 -
2.2.3 Výběr zdroje ..... - 5 -
2.3 Úschova elektrické energie ..... - 7 -
2.3.1 Kapacitní uložení energie ..... - 7 -
2.3.2 Induktivní uložení energie ..... - 8 -
2.4 Spínač ..... - 9 -
2.4.1 Tyristor ..... - 9 -
2.4.2 Tranzistor ..... - 10 -
2.4.3 Jiskřiště ..... - 11 -
2.5 Tvarovače průběhu ..... - 13 -
2.5.1 RC obvod ..... - 13 -
2.5.2 Tvarovací vedení ..... - 13 -
3. Řešení ..... - 16 -
3.1 Realizace vysokonapěťového zdroje ..... - 16 -
3.1.1 Schéma zapojení ..... - 16 -
3.1.2 Desky plošných spojů (DPS) ..... - 19 -
3.1.3 Osazovací výkresy ..... - 20 -
3.2 Konstrukce ostatních částí ..... - 22 -
3.2.1 Vysokonapěťový odpor 400 MΩ ..... - 22 -
3.2.2 Vysokonapěťový transformátor ..... - 23 -
3.2.3 Násobič napětí ..... - 24 -
3.2.4 Ochranný obvod ..... - 24 -
3.3 Oživení a měření ..... - 28 -
3.3.1 Oživení ..... - 28 -
3.3.2 Měření ..... - 29 -
4. Závěr ..... - 34 -
Seznam literatury ..... - 35 -
Seznam použitých zkratek a symbolů ..... - 36 -
Příloha č. 1 ..... - 38-

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Blokové schéma celého systému ..... - 1 -

Obr. 2.1 Ideální (čárkovaně) a reálný pravoúhlý impuls [6] ..... - 2 -
Obr. 2.2 Exponenciální (a) a dvojexponenciální (b) impuls [6] ..... - 3 -
Obr. 2.3 Zatěžovací charakteristika zdroje [4]. ..... - 3 -
Obr. 2.4 Schéma VN zdroje 7-46 kV ..... - 6 -
Obr. 2.5 Struktura, značka a voltampérová charakteristika [3]. ..... - 9 -
Obr. 2.6 Tranzistor jako spínač [5]. ..... - 10 -
Obr. 2.7 Výstupní charakteristiky tranzistorového spínače [5]. ..... - 11 -
Obr. 2.8 Jiskřiště s třemi elektrodami ..... - 12 -
Obr. 2.9 (a) Zapojení obvodu RC, (b) časový průběh napětí na zátěži. ..... - 13 -
Obr. 2.10 Obvod s tvarovacím vedením. ..... - 13 -
Obr. 2.11 Pravoúhlý impuls na konci vedení. ..... - 14 -
Obr. 2.12 (a) Řez koaxiálním vedením, (b) koaxiální vedení. ..... - 15 -

Obr. 3.1 Řídící část zdroje ..... - 16 -
Obr. 3.2 Schéma miliampérmetru ..... - 17 -
Obr. 3.3 Fotografie analogového miliampérmetru ..... - 17 -
Obr. 3.4 Schéma voltmetru ..... - 18 -
Obr. 3.5 a) Mikroampérmetr b) Úprava na kilovoltmetr ..... - 18 -
Obr. 3.6 DPS řídící části zdroje ..... - 19 -
Obr. 3.7 DPS ampérmetru ..... - 19 -
Obr. 3.8 DPS voltmetru ..... - 19 -
Obr. 3.9 Osazovací výkres řídící části zdroje ..... - 20 -
Obr. 3.10 Osazovací výkres ampérmetru ..... - 20 -
Obr. 3.11 Osazovací výkres voltmetru ..... - 20 -
Obr. 3.12 Fotografie krabice KP-30 ..... - 22 -
Obr. 3.13 Foto VN odporu [8] ..... - 23 -
Obr. 3.14 Fotografie VN transformátoru ..... - 23 -
Obr. 3.15 Fotografie kaskády K 1895-641-045 ..... - 24 -
Obr. 3.16 Vnitřní schéma obou televizních kaskád [7] ..... - 24 -
Obr. 3.17 Schéma ochranného obvodu ..... - 25 -
Obr. 3.18 Keramický izolátor do 50 kV ..... - 25 -
Obr. 3.19 Pohled do VN zdroje ..... - 26 -
Obr. 3.20 Vrchní panel VN zdroje ..... - 26 -
Obr. 3.21 Přední panel VN zdroje ..... - 27 -
Obr. 3.22 Zadní panel VN zdroje ..... - 27 -
Obr. 3.23 VN zdroj na maximu ..... - 28 -
Obr. 3.24 Zvlnění výstupního napětí (dělič 1:1, R_1=R_2=1 GΩ, U_{vyst} = 10 kV) ..... - 29 -
Obr. 3.25 Zvlnění výstupního napětí (dělič 1:1, R_1=R_2=1 GΩ, U_{vyst} = 20 kV) ..... - 30 -
Obr. 3.26 Zvlnění výstupního napětí (dělič 1:1, R_1=R_2=1 GΩ, U_{vyst} = 30 kV) ..... - 30 -
Obr. 3.27 Zvlnění výstupního napětí (dělič 1:1, R_1=R_2=100 MΩ, U_{vyst} = 10 kV) ..... - 31 -
Obr. 3.28 Zvlnění výstupního napětí (dělič 1:1, R_1=R_2=100 MΩ, U_{vyst} = 20 kV) ..... - 31 -
Obr. 3.29 Zvlnění výstupního napětí (dělič 1:1, R_1=R_2=100 MΩ, U_{vyst} = 30 kV) ..... - 32 -
Obr. 3.30 Zvlnění výstupního napětí (naprázdno, U_{vyst} = 15 kV) ..... - 32 -
Obr. 3.31 Zdroj zapojen jako generátor napěťových impulsů vysoké úrovně pro testování optických senzorů ..... - 33 -

Seznam tabulek

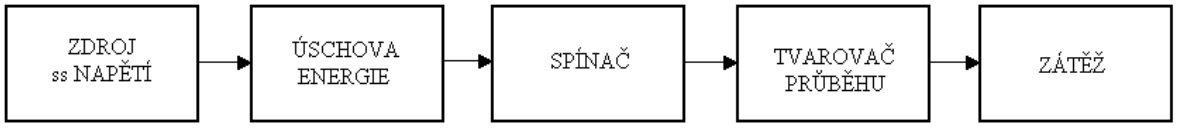
Tabulka 1: Seznam součástek zdroje ..... - 21 -
Tabulka 2: Rozměry vysokonapěťového odporu 3WK 680 09..... - 22 -
Tabulka 3: Parametry vysokonapěťového odporu 3WK 680 09 ..... - 23 -

1. Úvod

Cílem této práce je zabývat se problematikou generování napěťových impulsů vysoké úrovně a navrhnout generátor napěťových impulsů vysoké úrovně. Zařízení se bude skládat ze zdroje ss napětí, prvku pro uložení energie, spínače, tvarovače průběhu a zátěže. Na Obr. 1.1 je blokové schéma celého systému.

V teoretickém rozboru jsou nejprve popsány tvary exponenciálních a pravoúhlých impulsů a jejich parametry. Dále pak podrobně rozebrány možnosti, jak realizovat jednotlivé bloky generátoru napěťových impulsů. Tato část práce obsahuje také teorii o vysokonapěťovém zdroji, který budeme později realizovat.

V hlavní části práce podrobně popisuji samotnou realizaci vysokonapěťového zdroje. Nejprve jsou zde znázorněna schémata, desky plošných spojů a osazovací výkresy. Dále popisuji poměrně složitou konstrukci ostatních částí zdroje.



Obr. 1.1 Blokové schéma celého systému.

Zdroj napětí

Zdroj napětí dodává elektrickou energii do celého zařízení. V našem případě potřebujeme vysokonapěťový zdroj, jehož výstupní napětí bude řádově v desítkách kV.

Úschova energie

Tento blok slouží pro nahromadění a uchování elektrické energie dodané ze zdroje napětí. Pro úschovu elektrické energie může sloužit například kondenzátor nebo cívka, které budou popsány v teoretickém rozboru.

Spínač

V elektronice existuje mnoho spínacích součástek. Pro naši práci je třeba spínače s co nejkratší dobou sepnutí. Dobře by mohl posloužit tranzistor, tyristor nebo jiskřiště.

Tvarovač průběhu

Jedná se o funkční bloky, které mění tvar časového průběhu. V teoretickém rozboru si popíšeme RC obvod a obvod s tvarovacím vedením (PFL).

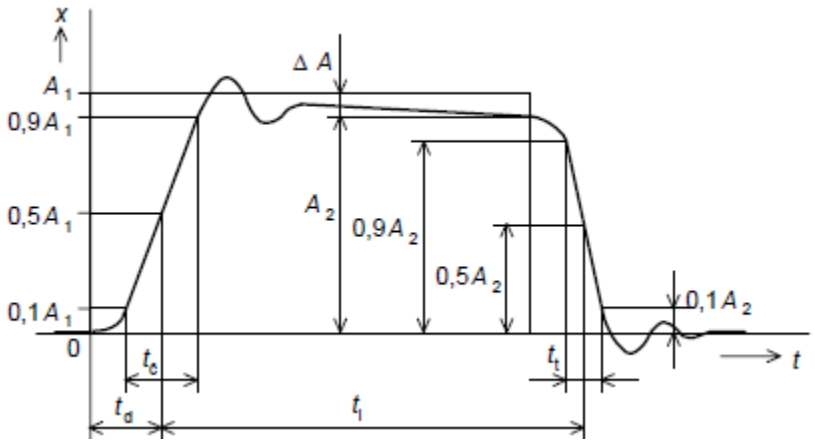
2. Teoretický rozbor

2.1 Tvary impulsů

Impuls je krátkodobá relativní výchylka elektrické veličiny ze základní (klidové) hodnoty (úrovně), do níž se po určité době představující šířku impulsu tato veličina opět vrací. Impulsy mohou mít různý tvar, například pravoúhlý, exponenciální, dvojexponenciální, Diracův atd. Výchylka tvořící impuls může být kladná nebo záporná. [6]

Pravoúhlý impuls: Pravoúhlý impuls je složen z čela, temene a týlu impulsu. Ideální pravoúhlý impuls je tvořen dvěma jednotkovými skoky násobenými veličinami se stejnou absolutní hodnotou udávající výšku impulsu a různými znaménky, časově vzájemně posunutými o dobu představující šířku impulsu t_i. U tohoto impulsu je čelo i týl skokové a temeno má konstantní výšku. V praxi se však za pravoúhlé označují impulsy, které se ideálním jenom blíží. Odlišnost reálného pravoúhlého impulsu od ideálního se vyjadřuje pomocí parametrů impulsu. [6]

Parametry: doba čela ..... t_c
doba týlu ..... t_t
zpoždění impulsu ..... t_d
pokles temene ..... $\Delta A = A_1 - A_2$



Obr. 2.1 Ideální (čárkovaně) a reálný pravoúhlý impuls [6].

Exponenciální impuls: Pro definici exponenciálního impulsu si nejdříve budeme definovat jednotkový skok. Používá se pro zapisování funkcí vyjadřující tvary signálů:

$$\sigma(t)=0 \quad \text{pro } t<0, \tag{2.1}$$

$$\sigma(t)=1 \quad \text{pro } t>=0. \tag{2.2}$$

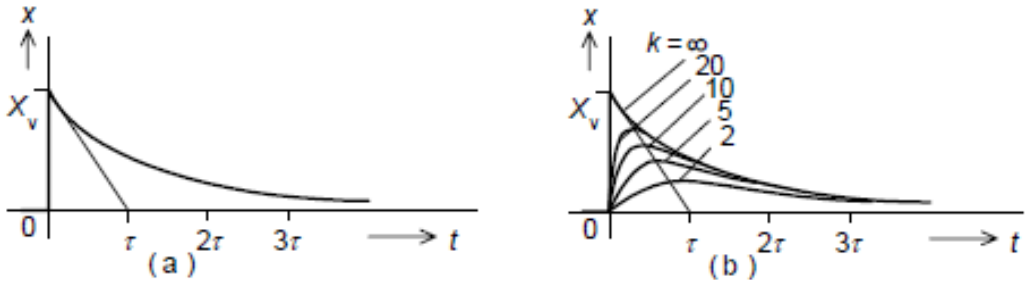
Pak exponenciální impuls lze vyjádřit zápisem:

$$x(t) = \sigma(t) \cdot X_V \cdot \exp(-t/\tau)\,. \tag{2.3}$$

Dvojexponenciální impuls pak:

$$x(t) = \sigma(t) \cdot X_V \cdot [\exp(-t/\tau) - \exp(-kt/\tau)]\,. \tag{2.4}$$

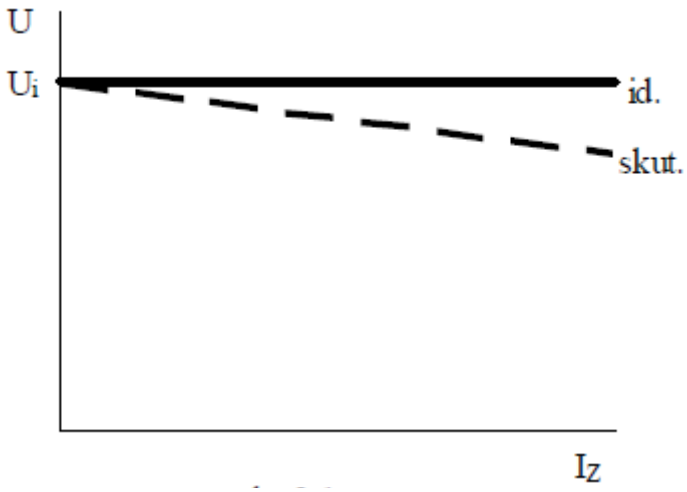
Náčrt exponenciálního a dvojexponenciálního impulsu je na Obr. 2.2. Význam veličin k a X_v je zřejmý z obrázku.



Obr. 2.2 Exponenciální (a) a dvojexponenciální (b) impuls [6].

2.2 Zdroj napětí

Stejnosměrný napájecí zdroj je zařízení, které umožňuje zásobovat elektronické obvody stejnosměrným napětím při určitém odebíraném proudu. Musí tedy s určitou rezervou pokrývat výkonové požadavky napájeného zařízení. Výstupní napětí napájecího zdroje nemá kolísat se změnami zatěžovacího proudu, tj. ideální napájecí zdroj se má chovat jako ideální zdroj stejnosměrného napětí (viz 0br. 2.3 - plná čára). Skutečný napájecí zdroj má však určitý vnitřní odpor, který způsobuje pokles zatěžovací charakteristiky s rostoucím zatěžovacím proudem (Obr. 2.3 – čárkovaná čára). Vnitřní odpor zdroje se může se zatěžovacím proudem měnit, takže zatěžovací charakteristika skutečného zdroje nemusí mít bezpodmínečně tvar přímky. Také výkonová zatížitelnost skutečného zdroje je omezena: odtud vyplývá maximální hodnota zatěžovacího proudu. [4]



Obr. 2.3 Zatěžovací charakteristika zdroje [4].

Zdroje napětí lze rozdělit na dvě hlavní skupiny: zdroje klasické koncepce a spínané (impulsně regulovatelné) zdroje.

2.2.1 Zdroje klasické koncepce

Napájecí zdroj klasické koncepce má síťový transformátor, který upravuje velikost střídavého napětí na potřebnou hodnotu, usměrňovač s kapacitním nebo induktivním výstupem, který vytvoří ze střídavého napětí pulsující stejnosměrné napětí a vyhlazovací filtr, který potlačí zvlnění výstupního stejnosměrného napětí zdroje na únosnou mez, jež je dána typem napájeného zařízení. Pokud jsou na neměnnost a zvlnění výstupního napětí kladeny vyšší požadavky, bývá za vyhlazovací filtr zařazen spojitě nebo nespojitě pracující stabilizátor stejnosměrného napětí. Každý stabilizátor funguje zároveň jako vyhlazovací filtr; proto je v některých zapojeních, využívajících stabilizátoru, vyhlazovací filtr vynechán. [4]

2.2.2 Spínané zdroje

Spínané zdroje využívají střídačů s bipolárními nebo unipolárními tranzistory (popřípadě s tyristory), které pracují na relativně vysoké frekvenci až stovek kHz. Střídače jsou řízeny nespojitě pracující zpětnou vazbou, ovlivňující šířku budících impulsů spínačů, jež má stabilizující účinek na výstupní napětí. Účinnost spínaných zdrojů je podstatně vyšší než u zdrojů s klasickou koncepcí. S využitím vyšších frekvencí nastává problém s usměrněním napětí, k tomu se používají tzv. “rychlé” diody, například Schottkyho. [4] Celková perioda střídače je popsána vztahem 2.5

$$T_C = T_A + T_B \quad , \tag{2.5}$$

<u>*kde:*</u> T_A ….. doba sepnutí střídače,

T_B ….. doba rozepnutí střídače.

Převrácená hodnota periody T_C se nazývá pracovní frekvence střídače f. Regulace výstupního napětí může být uskutečňována:

a) Změnou T_A při T_B = konst. (T_C není konst.) – při zmenšení vstupního napětí nebo při zvětšení zatěžovacího proudu roste T_A a tím i T_C, tj. klesá frekvence střídače f;

b) Změnou T_B při T_A = konst. (T_C není konst.) – při zmenšení vstupního napětí nebo při zvětšení zatěžovacího proudu klesá T_B a tím i T_C, tj. roste frekvence střídače f;

c) Změnou poměru $\frac{T_A}{T_B}$ při TC = konst. A tedy i frekvence střídače f = konst.

2.2.3 Výběr zdroje

Vzhledem k požadavkům na výstupní napětí a výstupní proud byl pro naši práci vybrán stabilizovaný regulovatelný zdroj VN 7 – 46 kV, který je popsán v literatuře [7]. Jedná se o regulovatelný zdroj vysokého napětí se stabilizací, stavěný za účelem testování dynamických vlastností optovláknových senzorů. Zdroj se také hodí například k testování izolantů a dielektrické pevnosti, měření zápalného napětí výbojek, neonů, vzduchu a jiných plynů, pokusy s elektrostatikou, testování obrazovek, ionizaci vzduchu a výrobu ozonu atd.

Maximální výstupní napětí: 7 – 46 kV

Maximální výstupní proud: cca 0,8 mA

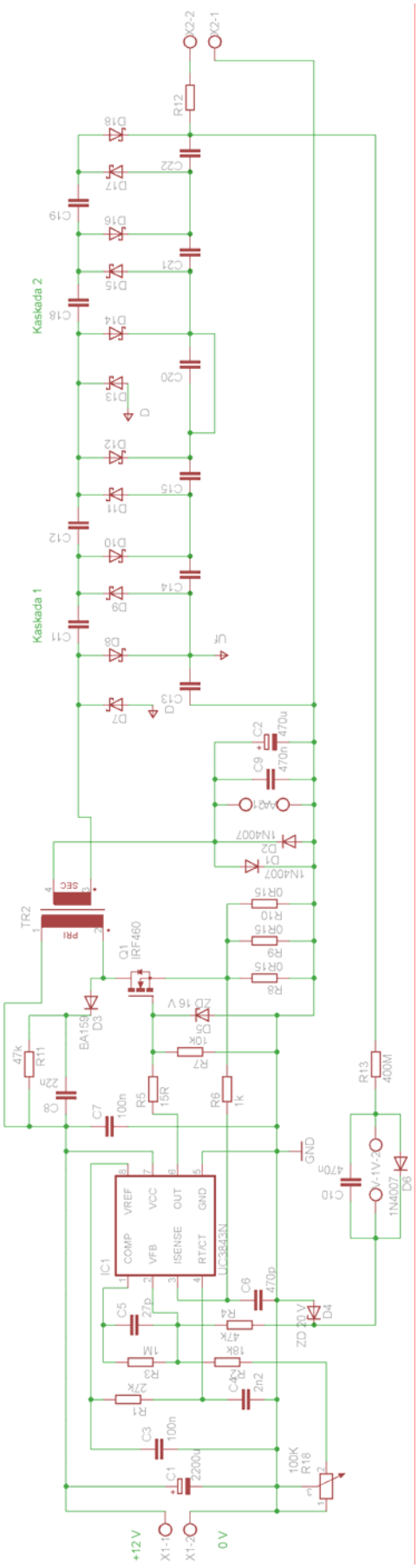
Pracovní frekvence: 12 kHz

Zdroj je zapojen jako jednočinný měnič s pulsně šířkovou regulací a Villardovým násobičem. Řídícím obvodem je UC3843, který zajišťuje stabilizaci napětí a ochranu proti přetížení. Násobič lze sestavit ze dvou televizních kaskád TPN-11/10 nebo jiného. Tyto kaskády se používaly v barevných televizorech s tyristorovým vychylováním. VN transformátor může pocházet z podobného typu TV. Jeho výstupní napětí je do cca 9 kV. Výstupní napětí je rovno 5x blokující půlperiodě + 4x propustné půlperiodě. Orientaci vinutí je proto nutné dodržet (propustná půlperioda má mnohem menší amplitudu než blokující). [7]

Komplikací je, že kaskády nemají vyveden vrchní konec živé řady kondenzátorů. U spodní kaskády je proto nutné se k tomuto bodu provrtat. Maximální napětí jedné kaskády je 23 kV, max. napětí ze dvou kaskád je teoreticky tedy 46 kV.

Odpor 400 MΩ má 4 funkce: Slouží jako zpětná vazba pro stabilizaci napětí, jako předřadník k voltmetru, jako vybíjecí odpor pro vybití kondenzátorů po vypnutí a jako zatěžovací odpor ve chvíli, kdy není připojena žádná zátěž. [7]

Kromě voltmetru je zdroj vybaven i miliampérmetrem. Ten měří výstupní proud. Miliampérmetr je ve schématu umístěn ve studeném konci sekundáru. Nevýhodou je fakt, že měří i proud procházející odporem 400 MΩ. V případě potřeby je možné ho umístit do studeného konce zátěže. Tento způsob připojení má nevýhodu v tom, že zátěž nemůže mít se zdrojem společný záporný pól. Třetí možností je umístit miliampérmetr přímo do VN výstupu, ale jeho izolace by byla značně náročná. Umístění miliampérmetru je tedy závislé na typu zátěže, se kterou má zdroj pracovat. Tranzistor je nutné umístit na chladič. [7]



Obr. 2.4 Schéma VN zdroje 7-46 kV

2.3 Úschova elektrické energie

2.3.1 Kapacitní uložení energie

Lze provést pomocí kondenzátoru, což je elektrotechnická součástka používána v elektrických obvodech k dočasnému uchování elektrického náboje, a tím i k uchování potenciální elektrické energie. Základní vlastností pro hodnocení kondenzátoru je jeho elektrická kapacita, technicky je kondenzátor určen maximálním povoleným napětím, druhem dielektrika a provedením vývodů (axiální, radiální). Někdy se také užívá pojmu kapacitor. Pokud se mluví o kapacitoru, je tím myšlena ideální součástka, jejíž jedinou vlastností je kapacita. Jako kondenzátor se označuje součástka skutečná, která má kromě kapacity i další parazitní vlastnosti. [1] [2]

Kondenzátor se skládá ze dvou vodivých desek (*elektrod*) oddělených dielektrikem. Na každou z desek se přivádí elektrické náboje opačné polarity, které se vzájemně přitahují elektrickou silou. Dielektrikum mezi deskami nedovolí, aby se částice s nábojem dostaly do kontaktu, a tím došlo k *neutralizaci*, jinak *vybití* elektrických nábojů. Přitom dielektrikum svou polarizací zmenšuje sílu elektrického pole nábojů na deskách a umožňuje tak umístění většího množství náboje. Velikost náboje na obou deskách je stejná. [1] [2]

Pro kapacitu deskového kondenzátoru platí vztah

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}\,, \tag{2.6}$$

<u>*kde:*</u> S ….. plocha desek kondenzátoru,

d ….. vzdálenost desek,

ε_0 …. permitivita vakua,

ε_r …. relativní permitivita.

Na desku kondenzátoru s kapacitou *C* lze uložit elektrický náboj

$$Q = C \cdot U\,, \tag{2.7}$$

<u>*kde:*</u> U ….. napětí mezi deskami kondenzátoru.

Napětí na nabitém kondenzátoru je stejné, jako je napětí zdroje. Napětí mezi elektrodami je stejné jak v součástce, tak na vodiči, kterým bychom je spojili zvenčí. Napětí můžeme vyjádřit jako rozdíl elektrostatických potenciálů obou elektrod [1]

$$U = \int_{r1}^{r2} E \cdot dl = \varphi_1 - \varphi_2\,, \tag{2.8}$$

<u>*kde:*</u> E ….. vektor el. pole mezi elektrodami,

r_1, r_2 ….. polohové vektory,

l …. vzdálenost desek.

Je-li dielektrikum kondenzátoru lineární, pak pro energii elektrického pole akumulovanou v nabitém kondenzátoru platí vztah [1]

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U \,. \tag{2.9}$$

Nabíjení kondenzátoru

Při zapojení kondenzátoru do obvodu se zdrojem stejnosměrného napětí se na deskách kondenzátoru začne hromadit elektrický náboj - kondenzátor se *nabíjí*. Nabíjení probíhá, dokud se nevyrovná elektrický potenciál na každé z desek s potenciálem příslušného pólu zdroje. Po nabití je mezi deskami kondenzátoru stejné elektrické napětí jako mezi svorkami zdroje, obvodem neprochází el. proud. [1]

Vybíjení kondenzátoru

Jestliže se desky kondenzátoru vodivě propojí, elektrický náboj z desek se odvede, kondenzátor se vybije. Tento přesun elektrického náboje způsobí v obvodu elektrický proud. [1]

Vybíjecí proud může v případě malého odporu vybíjecího obvodu dosáhnout obrovských špičkových hodnot. To má většinou nejen škodlivé účinky na vybíjecí obvod a kondenzátor samotný, ale vede to i k částečnému vyzáření jeho energie ve formě interferenčního rušení. [1] [2]

2.3.2 Induktivní uložení energie

Uložit energii lze také pomocí indukčnosti cívky. Indukčnost je jedna ze základních charakteristik cívky - vyjadřuje schopnost cívky změnit elektrickou energii na energii magnetického pole. Čím *větší* je indukčnost cívky, tím *silnější* magnetické pole kolem cívky vznikne při stejné velikosti elektrického proudu procházejícího cívkou.

Indukčnost cívky lze ovlivnit počtem závitů, rozměry a tvarem cívky a prostředím kolem cívky - zvláště vložením jádra do cívky. Cívka s *větším* počtem závitů má *větší* indukčnost, cívka s jádrem má *větší* indukčnost než cívka bez jádra. Indukčnost závisí také na tvaru jádra - uzavřené jádro významně *zvětšuje* indukčnost. [1] [2]

Z geometrických vlastností cívky můžeme indukčnost vypočítat podle vztahu

$$L = \frac{\mu \cdot N^2}{l} \cdot S \,, \tag{2.10}$$

kde: μ….. permeabilita prostředí,

N … počet závitů,

l …. délka cívky,

S…. obsah průřezu cívky.

Indukčnost můžeme také vypočítat podle vztahu

$$L = \frac{\phi}{I} \,, \tag{2.11}$$

kde: Φ….. magnetický indukční tok,

I …… elektrický proud.

Pro výpočet energie magnetického pole kolem cívky platí vztah

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 , \qquad (2.12)$$

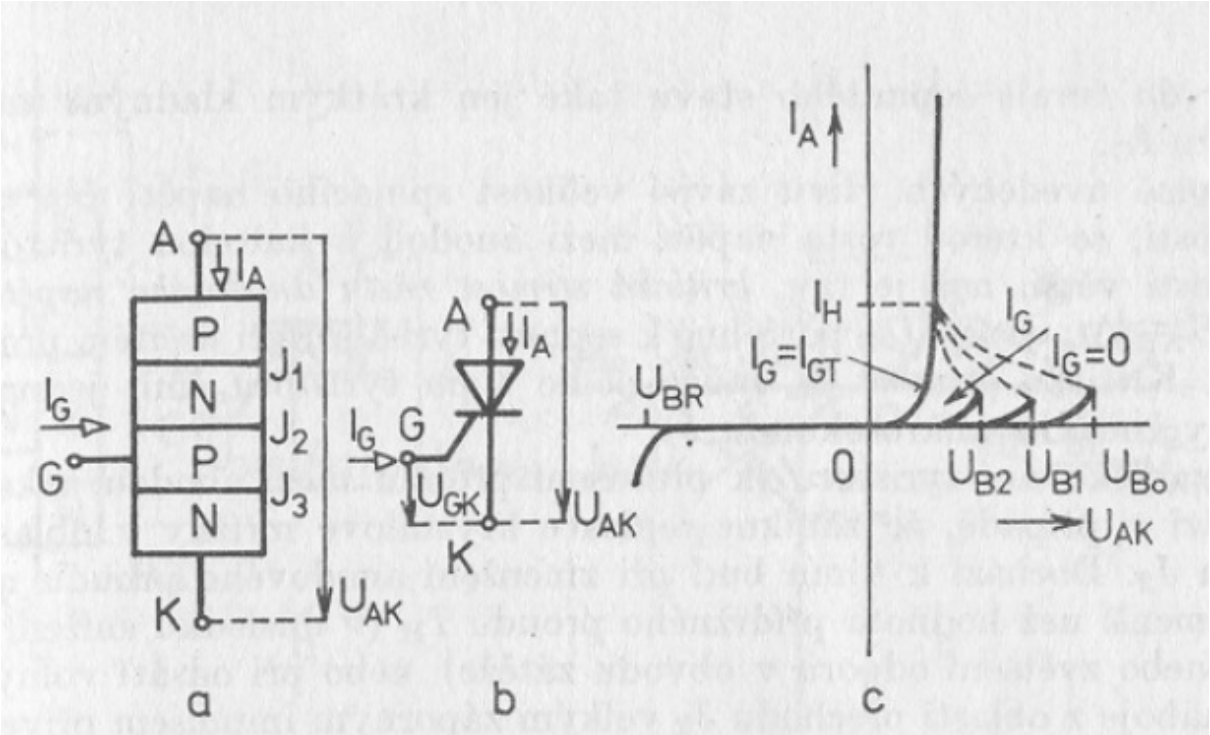
kde: I….. elektrický proud.

2.4 Spínač

Polovodičové spínací součástky pro výkonovou elektroniku využívají stejné principy jako běžně používané polovodičové součástky malých výkonů. Tvar, náběžná hrana i amplituda výstupního impulsu je závislá na vlastnostech spínačů. Pro spínací součástky je velmi důležitá doba spínání. V našem případě potřebujeme součástku s co nejmenší dobou sepnutí, což lze realizovat pomocí tranzistoru, tyristoru nebo jiskřiště.

2.4.1 Tyristor

Tyristor je čtyřvrstvová spínací součástka vyráběná z křemíku, ve které jsou vytvořeny tři nad sebou ležící přechody PN. Strukturu, schematickou značku a voltampérovou charakteristiku ukazuje Obr. 2.5. [3]



Obr. 2.5 Struktura, značka a voltampérová charakteristika [3].

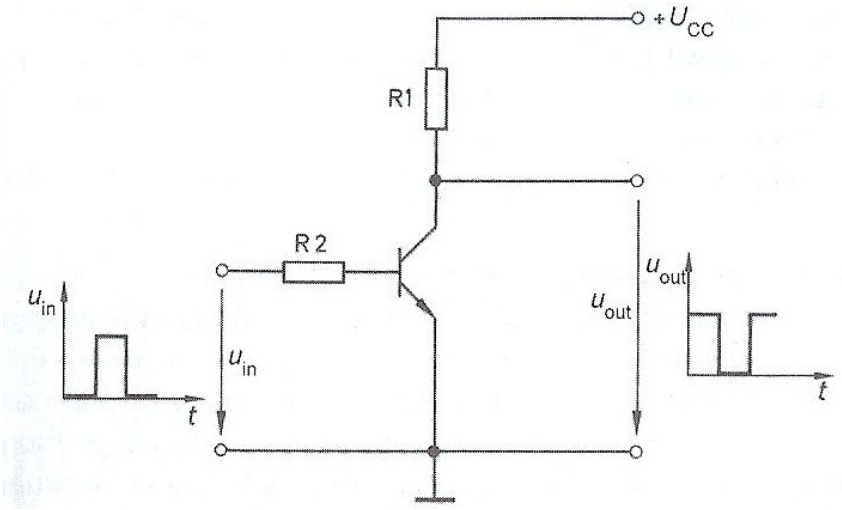
Vnější vrstva P je anodou, vnější vrstva N katodou tyristoru. Těmito elektrodami prochází po sepnutí celkový výstupní proud, jehož velikost může podle typu tyristoru dosahovat jednotek až stovek ampérů. Jedna z vnitřních vrstev tyristoru (v tyristorech TESLA je to vrstva s vodivostí typu P) je vyvedena jako řídící elektroda G. Přechody

J1, J2, J3 jsou označeny na obrázku 2.5. Bude – li řídící elektroda G odpojena a přiložíme – li na anodu tyristoru malé kladné napětí proti katodě, otevřou se přechody J1 (kladným napětím na vrstvě P) a J3 (záporným napětím na vrstvě N). Přechod J2 zůstane uzavřen, neboť do vrstvy N proniká kladné napětí přes otevřený přechod J1 a do vrstvy P záporné napětí přes otevřený přechod J3. Za této situace je tyristor zablokován. [3]

Odpor mezi anodou a katodou je několik megaohmů a proud v obvodu anody (v pracovním obvodu tyristoru) je téměř nulový. Při zvyšování napětí mezi anodou a katodou se zvětšuje intenzita elektrostatického pole v oblasti přechodu J2. Při určité velikosti tohoto napětí (na Obr. 2.5 je to U_{B0}) dosáhne intenzita elektrostatického pole své kritické hodnoty, při které dochází k ionizaci krystalové mřížky (pro křemík asi 10^7 V/m). Odpor v oblasti přechodu J2 se zmenší a v obvodu anoda - katoda se objeví velký proud. Zmenšení odporu tyristoru je tak značné (na desetiny až setiny ohmů), přestože stoupl proud, zmenšilo se napětí mezi anodou a katodouasi na 1,5 – 2 V. Říkáme, že tyristor přešel do sepnutého (vodivého) stavu. Doba potřebná k ionizaci krystalové mřížky se nazývá zapínací doba. Činí řádově jednotky mikrosekund a označuje se t_{ON}. [3]

2.4.2 Tranzistor

Nejvhodnější v našem případě bude využití tranzistoru ve spínacím režimu. Ve spínacím zesilovači má tranzistor jeden ze dvou stavů – “vodivý” nebo ”uzavřený”. Má proto dva pracovní body. Zapojení spínacího zesilovače je uvedeno na Obr. 2.6. Pokud je vstupní proud I_B=0 A, je tranzistor uzavřený a neprotéká jím žádný proud a na kolektorovém rezistoru nevzniká žádný úbytek napětí, takže je výstupní napětí rovno napětí napájecímu $u_{OUT}=U_{CC}$. Na Obr. 2.7 je tento pracovní bod ve výstupních charaktaristikách tranzistoru označen jako A1. [5]

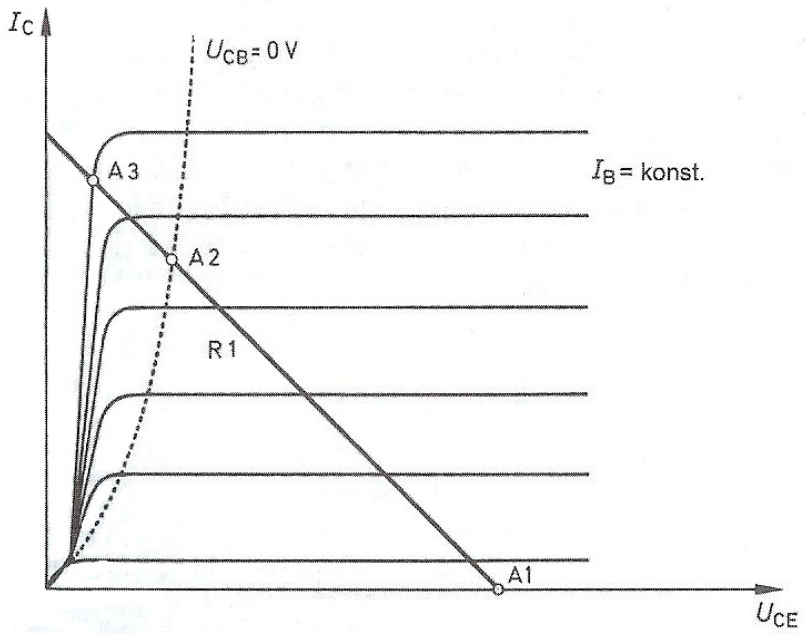


Obr. 2.6 Tranzistor jako spínač [5].

Druhý bod leží v oblasti nasycení, pro jejíž hranici platí že U_{CB}= 0 V. Tato situace nastane v případě, že je zbytkové napětí tranzistoru stejně velké jako napětí přechodu báze – emitor. V charakteristikách na Obr. 2.7 leží pracovní bod A2 právě na hranici nasycení. Pokud by měl mít tranzistor klidový pracovní bod v poloze A2, měl by ještě relativně velké zbytkové napětí $U_{CE\ res}$= 0,7 V a tudíž by měl relativně velký ztrátový výkon P_D. Proto je vhodné tranzistor přebudit (pracovní bod posunout

do oblasti nasycení), čímž zbytkové napětí klesne. Jedná se vlastně o stav, kdy do báze teče větší proud, než jaký bychom pořebovali pro dosažení maximálního kolektorového proudu.

Čím je nasycení vetší, tím více se pracovní bod po zatěžovací přímce posune od bodu A2 do bodu A3. Důsledkem je snížení zbytkového napětí kolektoru až k hodnotám kolem $U_{CE\ res}$ = 0,1 V, čímž výrazně klesne ztrátový výkon tranzistoru v sepnutém stavu. [5]



Obr. 2.7 Výstupní charakteristiky tranzistorového spínače [5].

Činitel nasycení s je dán poměrem proudu báze I_B, který bází skutečně protéká k proudu báze I'_B, který byl nutný pro dosažení hranice nasycení: [5]

$$s = \frac{I_B}{I'_B}, \tag{2.13}$$

<u>*kde:*</u> I_B….. proud, který do báze skutečně teče,
I'_B…. proud báze na hranici nasycení.

V praxi se často volí činitel nasycení s = 2 až 10.

2.4.3 Jiskřiště

Jiskřiště je elektrické zařízení, které se využívá při měření a spínání vysokých a velmi vysokých napětí. Nejčastěji se skládá ze dvou elektrod, které mohou být provedeny v mnoha tvarech. Je možné se setkat s kulovými elektrodami, hroty, elektrodami deskovými a mnoha dalšími. Princip činnosti jiskřiště je založen na přeskoku v plynném nebo kapalném prostředí. Tohoto přeskoku lze však dosáhnout až za hranicí přeskokového napětí a je tedy možné toto napětí využít pro spínání.

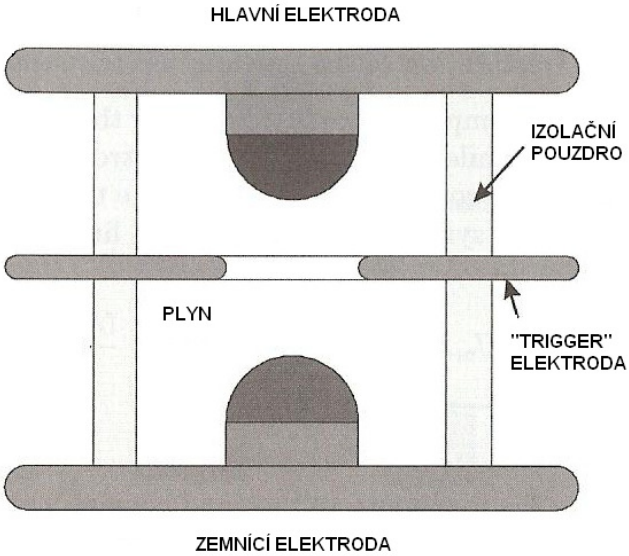
Jiskřiště lze dělit do několika skupin dle více kritérií. Například podle mechanického provedení, podle množností spouštění atd.

d) ***Dělení podle možností spouštění:*** 1) *překročení napětí U_{BR} (průrazné napětí)*
2) spouštění ionizací

Jiskřiště, která se spouštějí ionizací, se dále dělí:

a) Laser pulse

b) UV zářením - zářivka
- jiskřiště s třemi elektrodami



Obr. 2.8 Jiskřiště s třemi elektrodami

e) ***Dělení podle mechanického provedení:***

kulové: Velikost zapalovacího napětí se nastavuje změnou vzdálenosti nebo průměrem koulí. Nevýhodou je rozptyl vzniklého ozónu ionizací vzduchu do blízkého okolí. [3]

trubkové: (vodič uvnitř trubky) vzniklá jiskra se rozdělí na větší počet menších jisker. Výhodou trubkového jiskřiště je lepší ochlazování. Vzniklý ozón je pouze uvnitř trubky. Z důvodu lepšího odvodu je možno použít paralelní nebo sériové spojení více trubkových jiskřišť. Nevýhodou je nemožnost nastavení spojitého nastavení zápalného napětí. [3]

rotační: analogie rotujícího komutátoru proti stojícímu páru kontaktů. Rotace zabraňuje tažení oblouku a tím intenzivní ionizaci vzduchu. Změnou otáček lze měnit kmitočet tlumených zákmitů. Lze využít pro velké výkony, kde nelze používat polovodičových spínačů. [3]

2.5 Tvarovače průběhu

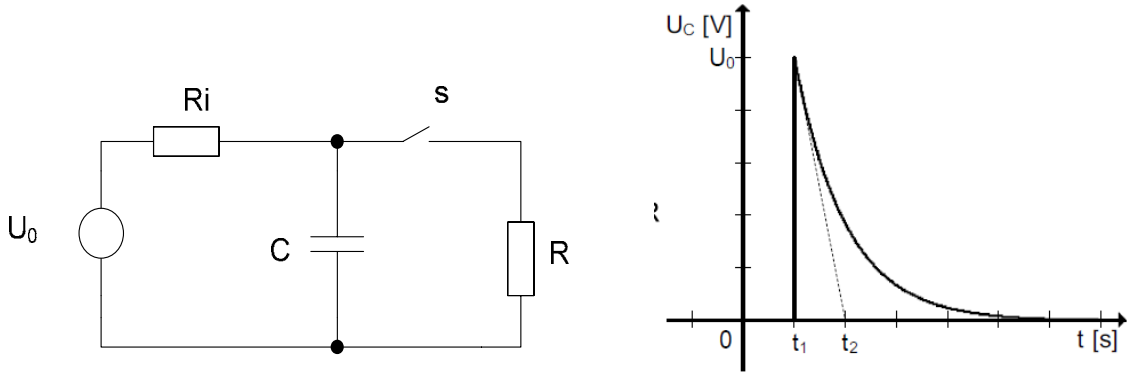
2.5.1 RC obvod

Na Obr. 2.9 (a) je znázorněno nejjednodušší zapojení zdroje impulsu. Jedná se o RC článek, kde kondenzátor C je paralelně připojen k zátěži R. Při vypnutém spínači se kondenzátor nabije na napětí U_0. Po sepnutí spínače se kondenzátor vybíjí do zátěže R, kde se objeví napětí u_c definováno vztahem

$$u_c = U_0 \cdot \exp(-\frac{t}{\tau}), \tag{2.14}$$

kde: u_c ……napětí na kondenzátoru C,

τ … …časová konstanta (τ =R.C).

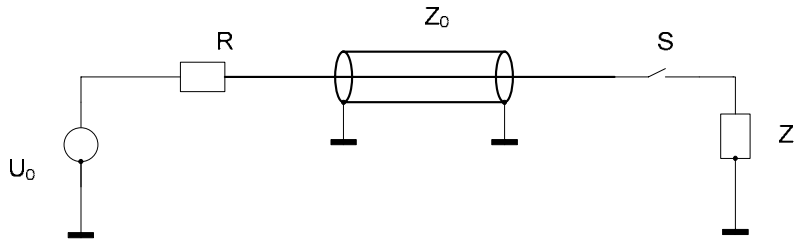


Obr. 2.9 (a) Zapojení obvodu RC, (b) časový průběh napětí na zátěži.

Na Obr. 2.9 (b) je znázorněn průběh napětí u_c na záteži R. V čase t_1 je na zátěži napětí U_0, které s časem exponenciálně klesá až k nulové hodnotě. V čase t_2 dosahuje hodnoty U_0/e, jak je patrné z obrázku.

2.5.2 Tvarovací vedení

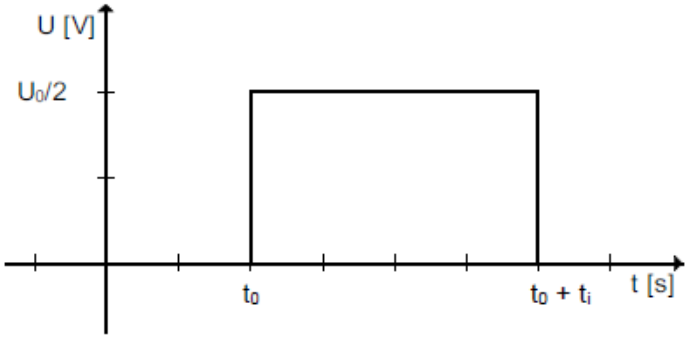
Další možností jak generovat napěťové impulsy je znázorněno na Obr. 2.10. Zapojení je stejné jako v předchozím případě, s tím rozdílem že místo RC článku je v obvodu zapojen koaxiální kabel. Předpokládejme, že koaxiální kabel má délku l a charakteristickou impedanci Z_0. Aby toto zapojení správně fungovalo, musí platit podmínka, že $Z=Z_0$.



Obr. 2.10 Obvod s tvarovacím vedením.

Po sepnutí spínače vznikne napěťový dělič, který je tvořen charakteristickou impedancí vedení Z_0 a impedancí zátěže Z. Tím na konci vedení vzniká napěťový

skok o velikosti: $U_0/2$, který se šíří zpětně vedením jako vlna směrem ke zdroji. Pokud je splněna podmínka že $Z_K >> Z_0$, kde Z_K je součet impedance zdroje a rezistoru R, dochází opět k odrazu a vlna putuje zpět směrem k zátěži se stejnou fází, kde vzniká napěťový impuls, který je znázorněn na Obr. 2.11.



Obr. 2.11 Pravoúhlý impuls na konci vedení.

Šířka pulsu t_i je pak dána dobou, kdy se vlna vzniklá napěťovým skokem vrátí zpět k zátěži a je dána vztahem

$$t_i = \frac{2l}{v_f}, \tag{2.15}$$

kde: l ……. délka koaxiálního kabelu,

v_f …….. fázová rychlost vlny.

Koaxiální vedení

Koaxiální vedení sestává ze dvou vodičů ve tvaru souosých válců. Prostor mezi válci je vyplněn nízkoztrátovým dielektrikem. Středním vodičem může být buď lanko, nebo plný drát (závisí na požadavcích na ohebnost). Vnějším vodičem je měděné opletení nebo vlnitá fólie.

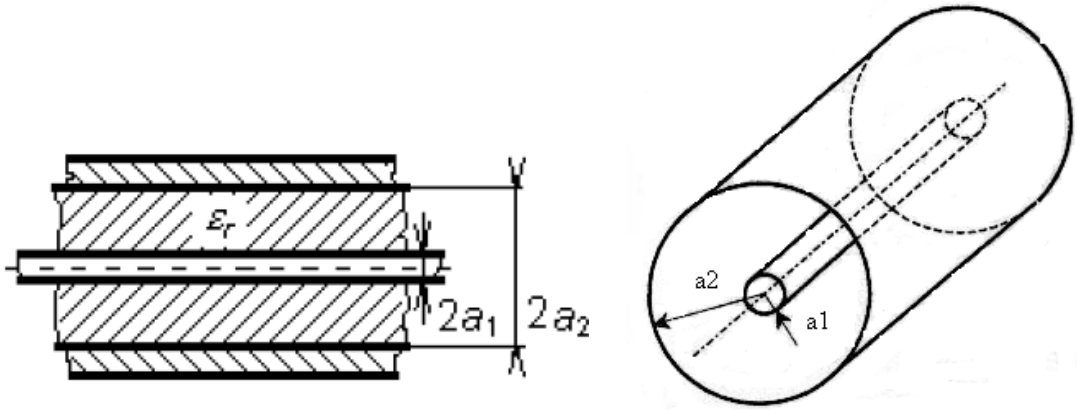
Důležitým parametrem koaxiálních kabelů je jejich charakteristická impedance Z_{OV}, kterou můžeme vyjádřit vztahem

$$Z_{OV} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \cdot \ln \frac{a_2}{a_1}, \tag{2.16}$$

kde: ε_r ……. relativní permitivita,

a_2, a_1…..... průměry vnějšího a vnitřního vodiče.

Běžně se prodávají koaxiální kabely s charakteristickou impedancí 50 Ω a 75 Ω a v různých průměrech (podle požadavků na přenášený výkon).



Obr. 2.12 (a) Řez koaxiálním vedením, (b) koaxiální vedení.

Útlum koaxiálního vedení je způsoben jak ztrátami ve vodičích, tak i ztrátami v dielektriku. Celkový útlum vedení je tedy dán součtem útlumu způsobeného ztrátami ve vodičích α_C a útlumu způsobeného ztrátami v dielektriku α_d.

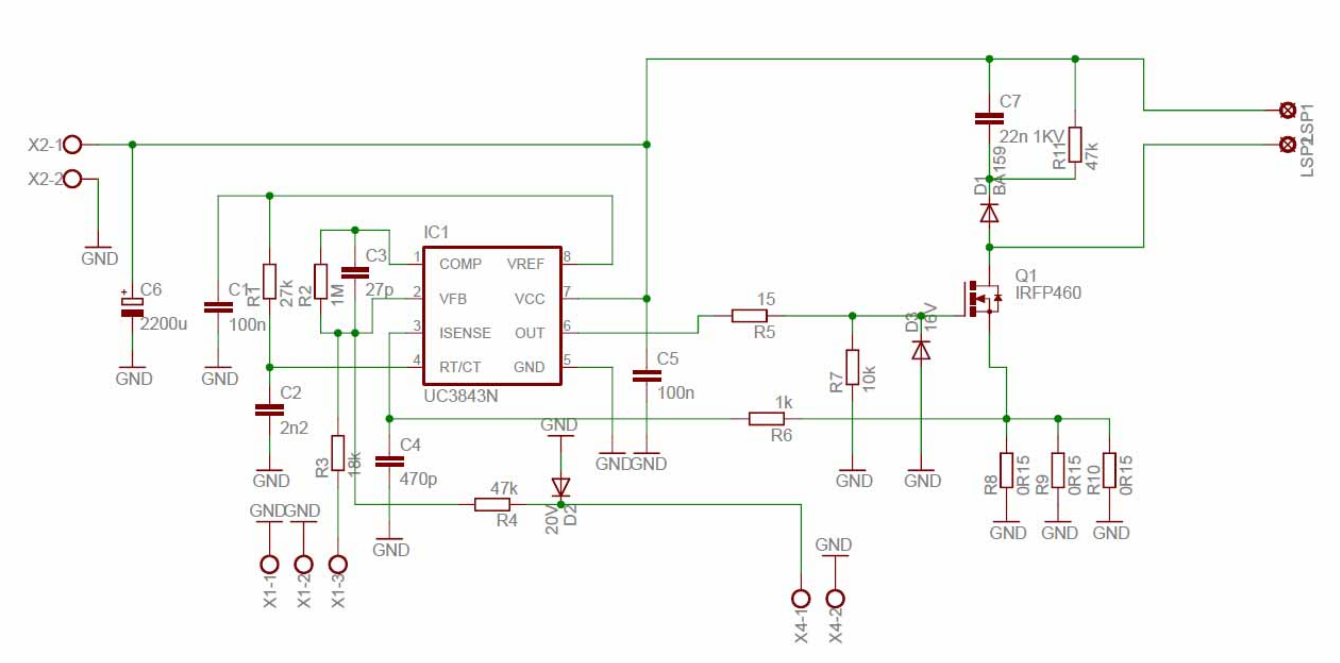
$$\alpha_{celk} = \alpha_C + \alpha_d \tag{2.17}$$

3. Řešení

3.1 Realizace vysokonapěťového zdroje

Po prostudování teorie o napájecích zdrojích jsem vybral variantu regulovatelného napájecího zdroje popsaného v literatuře [7]. V této části práce popíšu, jak jsem postupoval při stavění zdroje. Zdroj obsahuje celkem 3 desky plošných spojů DPS (řídící část zdroje, deska pro voltmetr a deska pro ampérmetr). Dále vysokonapěťový transformátor, vysokonapěťový odpor R = 400 MΩ a dvě televizní kaskády typu K 1895-641-045.

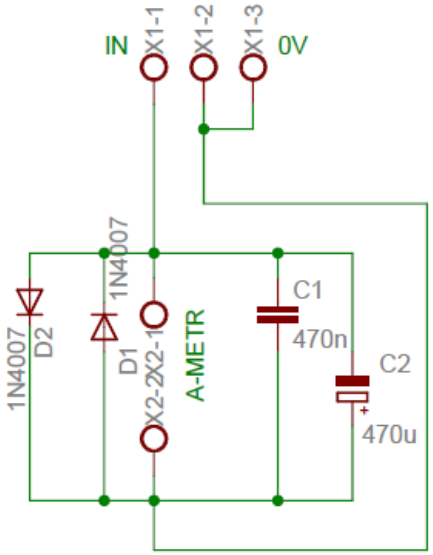
3.1.1 Schéma zapojení



Obr. 3.1 Řídící část zdroje

Popis

Vysokonapěťový zdroj je externě napájen 12V / 5A. Je zapojen jako jednočinný měnič s pulsně šířkovou regulací a Villardovým násobičem. Řídicím obvodem je UC 3843, který zajišťuje stabilizaci napětí a ochranu proti přetížení. Na svorky X1-1, X2-2 a X3-3 je připojen potenciometr 100 kΩ, kterým se reguluje výstupní napětí zdroje. Voltmetr je připojen na svorky X4-1 a X4-2. Svorky LSP1 a LSP2 slouží pro připojení vysokonapěťového transformátoru a následně dvou televizních kaskád typu K 1895-641-045.

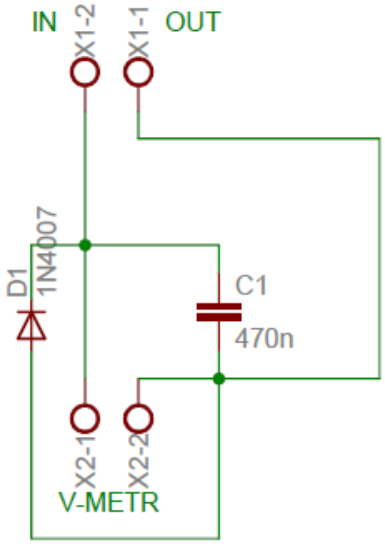


Obr. 3.2 Schéma miliampérmetru

Popis

Miliampérmetr je zapojen ve studeném konci sekundárního vinutí transformátoru. Na svorku X1-1 je připojen jeden konec sekundárního vinutí. Svorka X1-2 je připojena na zem. Na svorkách X2-1 a X2-2 je zapojen analogový miliampérmetr. Jelikož výstupní proud dosahuje maximálně hodnoty 0,8 mA, zvolil jsem miliampérmetr s rozsahem 1 mA. Foto analogového miliampérmetru je na Obr. 3.3.

Obr. 3.3 Fotografie analogového miliampérmetru



Obr. 3.4 Schéma voltmetru

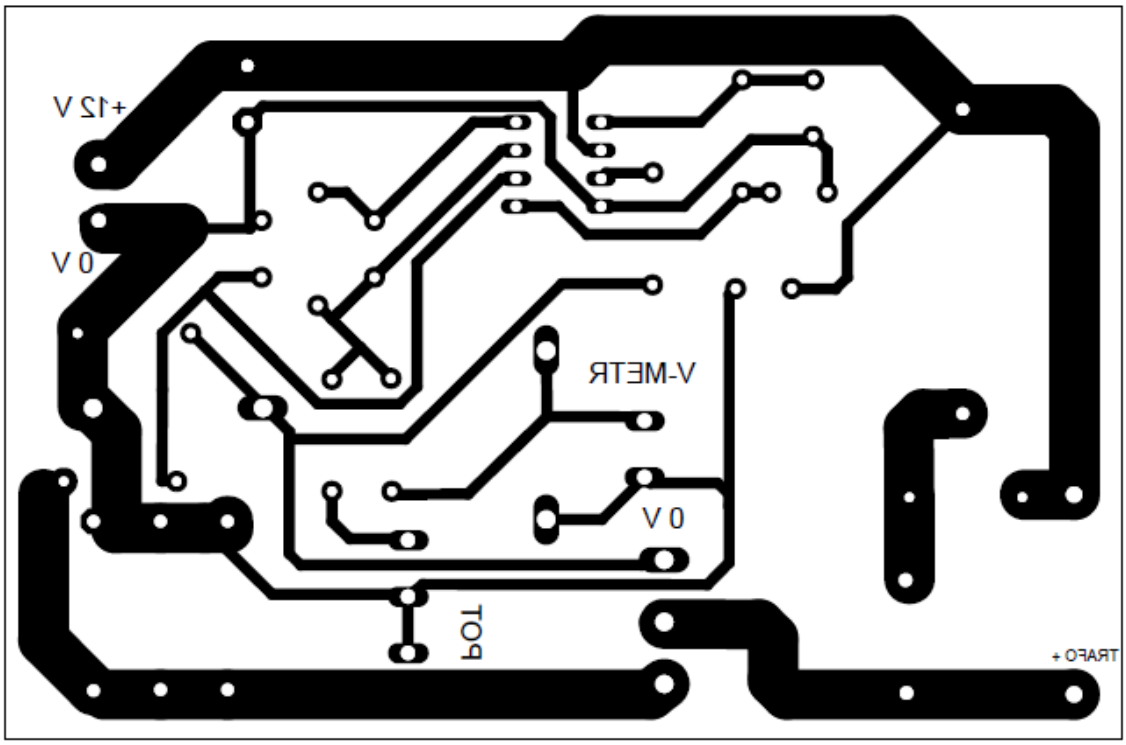
Popis

Na Obr. 3.4 je schéma zapojení voltmetru. Voltmetr je zapojen ve zpětné vazbě zdroje. Vstupní svorka X1-2 se propojí se svorkou X4-1 na řídící desce zdroje. Na svorku X1-1 se zapojí VN kabel odporu R=400 MΩ. Analogový voltmetr je zapojen mezi svorky X2-1 a X2-2. Jelikož je velice složité sehnat analogový kilovoltmetr, koupil jsem analogový mikroampérmetr s rozsahem 100 µA, přelepil stupnici na kilovolty a zdvojnásobil rozsah. To se provede tak, že změříme vnitřní odpor voltmetru (po změření vychází R_i=3,2 kΩ) a tu samou hodnotu odporu zapojíme paralelně ke kilovoltmetru. Fotografie mikroampérmetru a následné úpravy na kilovoltmetr viz níže.

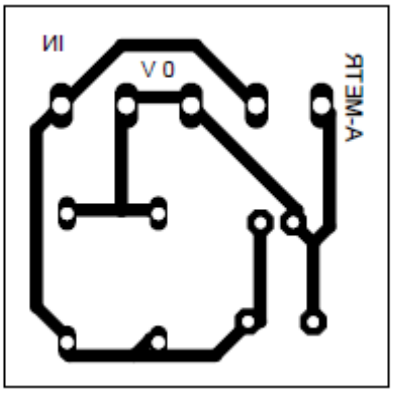
a) ***b)***

Obr. 3.5 a) Mikroampérmetr b) Úprava na kilovoltmetr

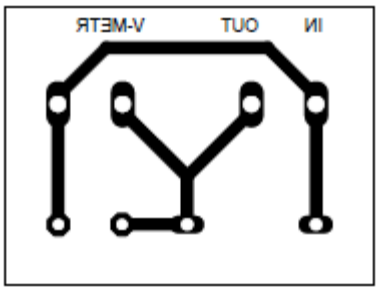
3.1.2 Desky plošných spojů (DPS)



Obr. 3.6 DPS řídící části zdroje

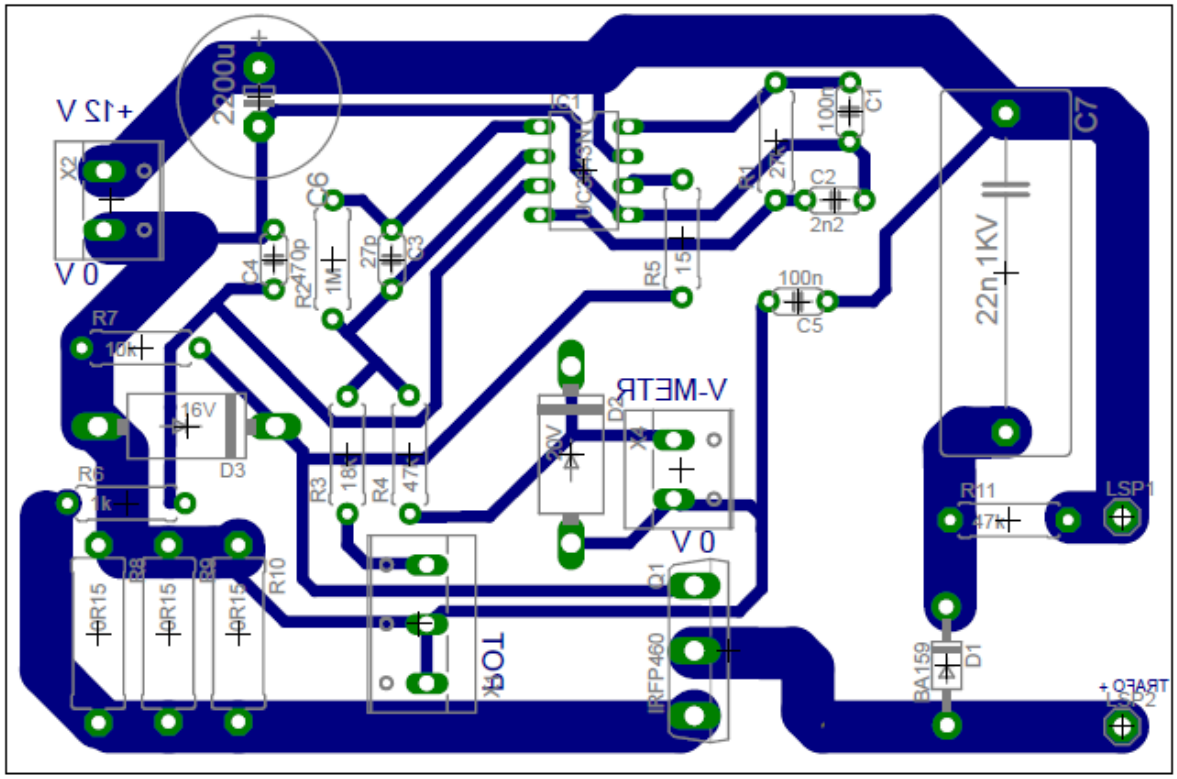


Obr. 3.7 DPS ampérmetru

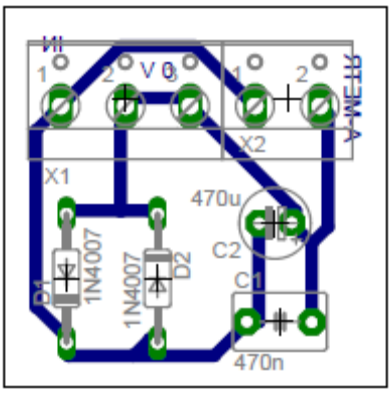


Obr. 3.8 DPS voltmetru

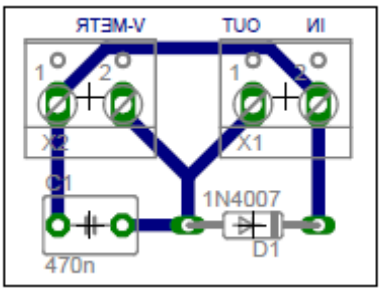
3.1.3 Osazovací výkresy



Obr. 3.9 Osazovací výkres řídící části zdroje



Obr. 3.10 Osazovací výkres ampérmetru



Obr. 3.11 Osazovací výkres voltmetru

SEZNAM SOUČÁSTEK

Název	Označení	Množství	Typ	Hodnota/Poznámka
IO	IC1	1	UC 3843N	+ patice 8 PIN
Tranzistor	Q1	1	IRFP 460	+ chladič
Dioda	D1, D2, D3, D5	4	BA 159	Schottkyho
Dioda	D4	1	BZX 83V020	Zenerova (20V)
Dioda	D6	1	BZX 83V020	Zenerova (16V)
Potenciometr	R18	1	PC1221NK	100k
Rezistor	R8, R9, R10	3	RRW2 (2W)	0,15 Ω
Rezistor	R11	1	RRW3 (2W)	47k
Rezistor	R13	2	3WK 680 09	200 M
Rezistor	R1, R2, R3, R4	4	RRU (0,6W)	27k, 18k, 1M, 47k
Rezistor	R6, R7	3	RRU (0,6W)	1k, 10k
Rezistor	R12	1	RRU (0,6W)	250k
Kondenzátor	C8	1	FKP1	22n/1600V
Kondenzátor	C1	1	elektrolytický	2200µ/16V
Kondenzátor	C2	1	elektrolytický	470µ/10V
Kondenzátor	C3, C4, C5, C6	3	keramický	100n, 2,2n, 27p, 470p
Kondenzátor	C7, C8, C9, C10	2	keramický	100n, 22n, 470n, 470n
Miliampérmetr	A1-2	1	HD-071	Rozsah 1mA
Voltmetr	V1-2	1	HD-070	Rozsah 80 KV
Krabice	KP–30	1	KP-30	černá
Relé	RELE	1	TNA-2C-120	12 V DC
LED-dioda	D7	1	L-813SRD-C	červená, 10 mm
Spínač	S	1	PB0-961	zámek s klíčkem

Tabulka 1: Seznam součástek zdroje

Desky plošných spojů a osazovací výkresy jsou znázorněny ve skutečné velikosti 1:1.

3.2 Konstrukce ostatních částí

Všechny části zdroje jsou umístěny ve čtyřdílné plastové krabici typu KP-30 zakoupené ve firmě GES electronics. Rozměry jsou 295 x 215 x 120 mm. Krabice obsahuje ventilační otvory a je vybavena čtyřmi vruty s možností namontování nožiček.

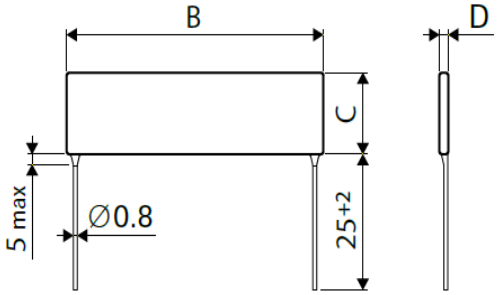
Obr. 3.12 Fotografie krabice KP-30

3.2.1 Vysokonapěťový odpor 400 MΩ

Při konstrukci VN zdroje jsem řešil problém, kdy je potřeba vysokonapěťový odpor o velikosti 400 MΩ, který slouží jako předřadník k voltmetru, zpětná vazba pro stabilizaci napětí, jako vybíjecí odpor při vybíjení kondenzátorů po vypnutí zdroje anebo jako zatěžovací odpor v okamžiku, kdy není připojena zátěž. Tento odpor by se dal sestavit z velkého množství odporů (např. 120 kusů odporu 3M3 / 0,6 W) pospojované do série. Takto sestavovat vysokonapěťový odpor by bylo nepraktické a velice pracné. Proto jsem se pokoušel sehnat již hotový VN-odpor, který jsem objednal ve firmě Tesla Blatná, jejichž nabízené vysokonapěťové odpory jsou popsány v literatuře [8].

Z nabízeného sortimentu jsem vybral vysokonapěťové rezistory typu ***3WK 680 09*** jejichž rozměry a parametry jsou popsány níže.

Typ	*3WK 680 06*	*3WK 680 08*	*3WK 680 09*
B_{max} [mm]	27	52	96
C_{max} [mm]	9	15	17,5
D_{max} [mm]	2,8	4,2	4,5



Tabulka 2: Rozměry vysokonapěťového odporu 3WK 680 09

Typ	P_N [W] při 40 °C	Rozsah hodnot	Max. provozní napětí U_{max}[kV]
3WK 680 06	1	M1 – 10G	4
3WK 680 08	3	M1 – 10G	20
3WK 680 09	6	M1 – 10G	40

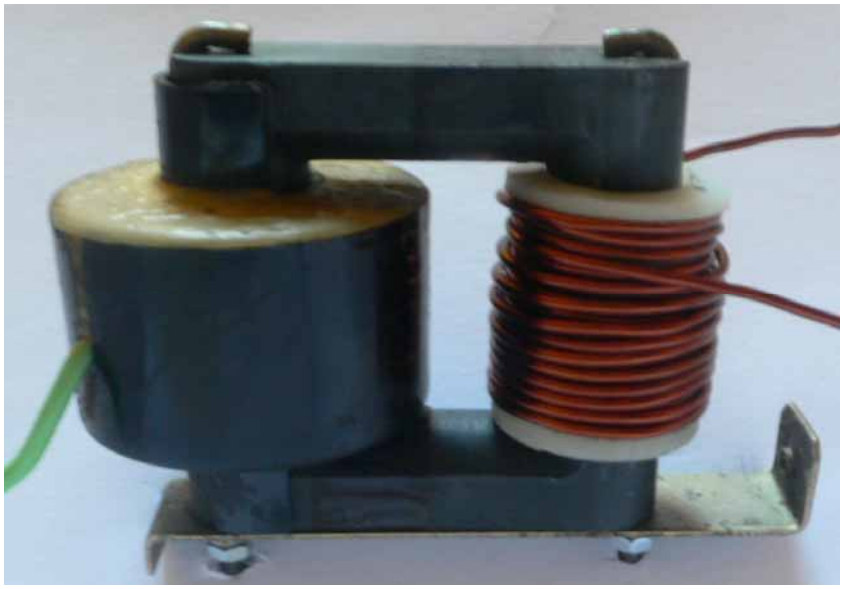
Tabulka 3: Parametry vysokonapěťového odporu 3WK 680 09

Z důvodu, že se na odporu 400 MΩ může objevit až 46 kV, a maximální provozní napětí na jednom odporu je 40 KV, jsem z řady E24 vybral 2 odpory s hodnotou 200 MΩ. Tyto odpory jsem zapojil do série tak, aby vznikla požadovaná hodnota 400 MΩ. Pro větší ochranu jsem celý odpor vložil do novodurové trubky, která je obalena lepicí páskou z alobalu a ten spojen se zemí. Oba konce odporu jsem opatřil vysokonapěťovým kabelem.

Obr. 3.13 Foto VN odporu [8]

3.2.2 Vysokonapěťový transformátor

Vysokonapěťový transformátor se mi podařilo získat ze staré televize typu TESLA COLOR. Výstupní napětí transformátoru je do cca 9 kV. Obě vinutí jsou navinuta na společném feritovém jádru, jejich orientaci je nutno dodržet. Primární vinutí je tvořeno 22 závity smaltovaného Cu vodiče o průřezu 2 mm^2.



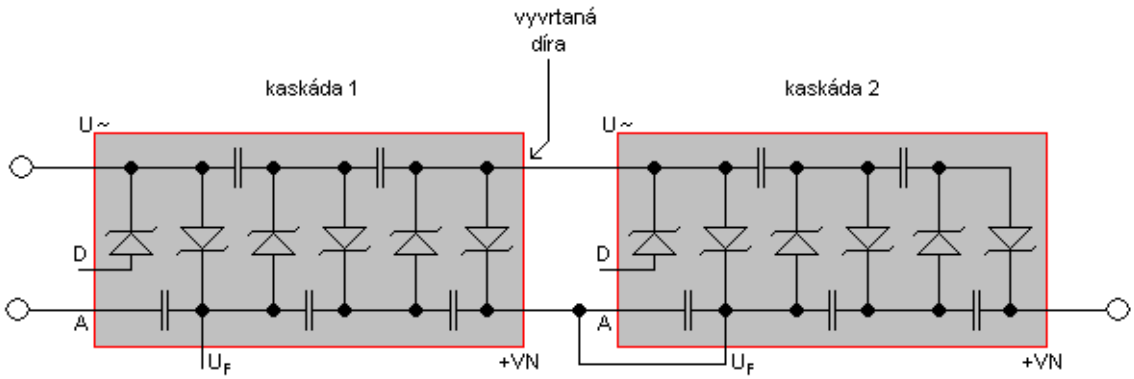
Obr. 3.14 Fotografie VN transformátoru

3.2.3 Násobič napětí

Násobiče napětí se používají pro získání ss výstupního napětí řádu stovek voltů až desítek kilovoltů a zatěžovací proudy jednotek až desítek miliampér. Násobič u tohoto zdroje je sestaven ze dvou televizních kaskád typu *K 1895-641-045,* zapojené v sérii. Komplikací je, že kaskády nemají vyveden vrchní konec živé řady kondenzátorů. Proto je nutné se u spodní kaskády k tomuto bodu provrtat. Na Obr. 3.15 je fotografie kaskády *K 1895-641-045*.

Obr. 3.15 Fotografie kaskády K 1895-641-045

Vnitřní schéma obou televizních kaskád a vzájemné propojení je na Obr. 3.16. Kaskády jsou zapojeny bez vnějšího kondenzátoru, tj. násobí se 5x blokující půlperioda a 4x propustná půlperioda.

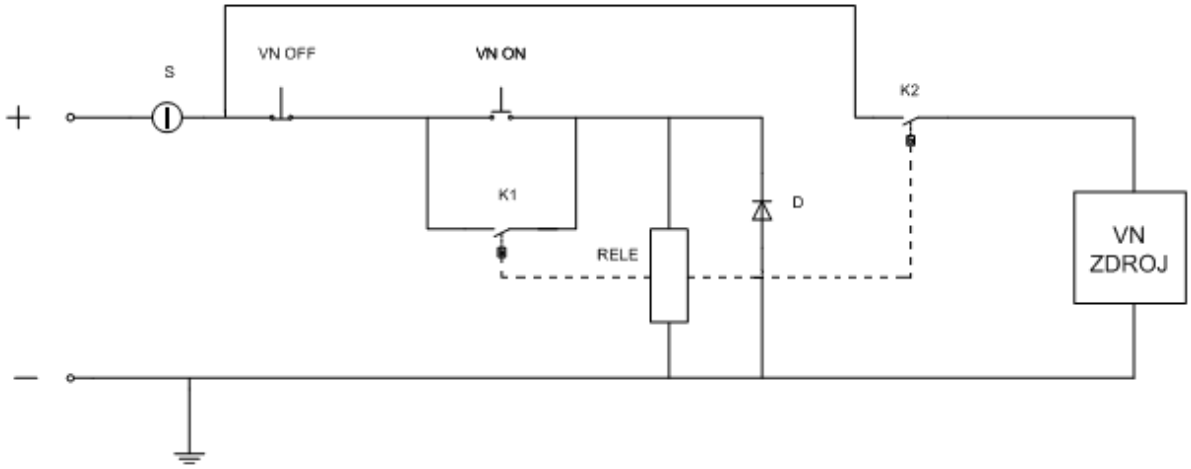


Obr. 3.16 Vnitřní schéma obou televizních kaskád [7]

3.2.4 Ochranný obvod

Jelikož je vysoké napětí velice nebezpečné, je potřeba dobré ochrany. Na Obr. 3.17 je schéma zapojení jednoduchého ochranného obvodu, umístěného před samotným vysokonapěťovým zdrojem. Na vstupu je umístěn spínač S, což je dvoupolohový zámek s klíčkem, který je umístěn na zadním panelu zdroje. Zámek je

zde umístěn proto, aby nedošlo k zapnutí zdroje neoprávněnou osobou. Spínač VN OFF slouží pro okamžité vypnutí napájení zdroje v okamžiku nebezpečí a VN ON pro znovu zapnutí napájení. Řídící kostry spínaného relé jsou ve schématu značeny jako K1 a K2. Obvod obsahuje také ochrannou diodu D.



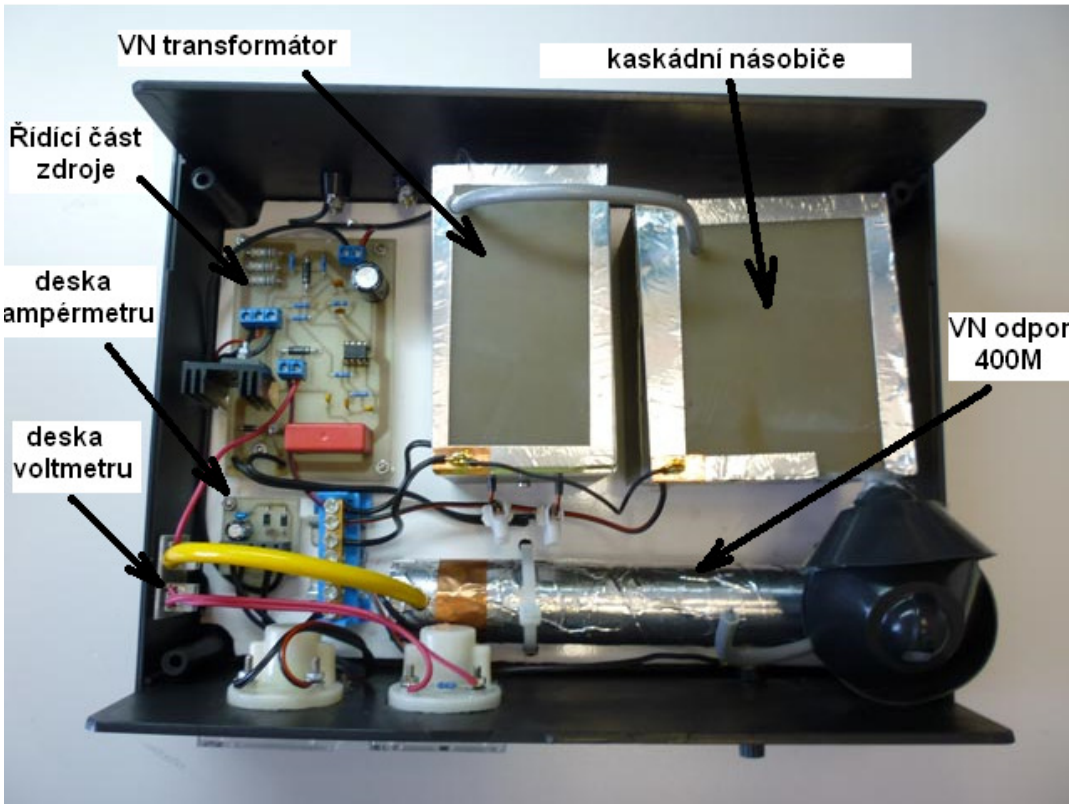
Obr. 3.17 Schéma ochranného obvodu

Kvůli rušení jsem všechny vysokonapěťové části (VN transformátor a obě televizní kaskády) umístil do stíněných krabiček, které jsem vyrobil z kuprexidové jednostranné desky (strana potažená mědí je uvnitř krabiček) a krabičky spojil se zemí.

Na přední panel jsem umístil analogový mikroampármetr a kilovoltmetr, tlačítko VN OFF pro rychlé vypnutí zdroje a tlačítko VN ON pro znovu zapnutí zdroje, zemnící svorku a potenciometr pro regulaci výstupního napětí. Analogové budíky jsem vybral z důvodu vyšší odolnosti proti rušení oproti digitálním displejům. Na vrchní straně zdroje je umístěna červená LED dioda, signalizující zapnutý stav vysokého napětí. Výstup vysokého napětí jsem umístil na vrchní stěnu krabice přes keramický izolátor. Jelikož jeden izolátor je do napětí 25 kV, umístil jsem dva nad sebe a spojil závitovou tyčí o průměru 4 mm. Kolem izolátoru je z kuprexidové desky vytvořena uzemněná plocha. Fotografie izolátoru je na Obr. 3.18.

Obr. 3.18 Keramický izolátor do 50 kV

Fotografie vnitřku zdroje s popisky rozmístění jednotlivých částí v krabici je na Obr. 3.19. Foto vrchní strany zdroje s VN vývodem je na Obr. 3. 20. Na dalších dvou fotografiích je přední a zadní panel zdroje.



Obr. 3.19 Pohled do VN zdroje

Obr. 3.20 Vrchní panel VN zdroje

Obr. 3.21 Přední panel VN zdroje

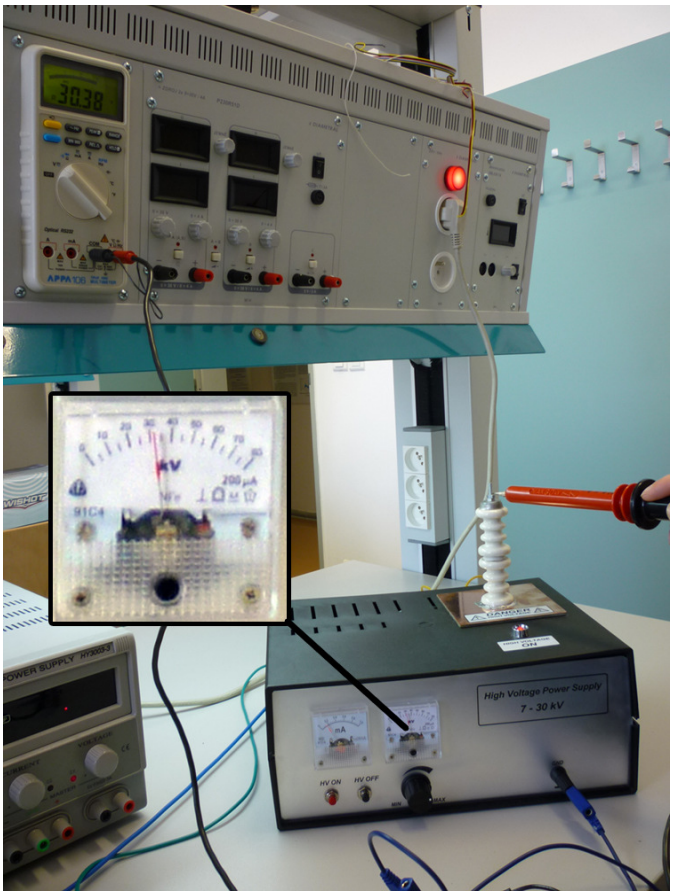
Obr. 3.22 Zadní panel VN zdroje

3.3 Oživení a měření

3.3.1 Oživení

Než se připojí vysokonapěťové části zdroje, je nutné samostatně oživit desku řídící části zdroje. Po vizuální kontrole správného osazení všech součástek jsem desku připojil na laboratorní zdroj 12 V DC. Deska fungovala na první zapojení. Na osciloskopu jsem pozoroval střídu signálu, jež budí tranzistor T1, který následně impulsně spíná primární vinutí vysokonapěťového transformátoru.

Nyní už můžeme připojit vysokonapěťový transformátor, dvě televizní kaskády K 1895-641-045 dle Obr. 3.16 a zpětnou vazbu tvořenou vysokonapěťovým odporem 400 MΩ a kilovoltmetrem. Transformátor a televizní kaskády jsou umístěny ve stíněných krabičkách. Všechny spoje mezi transformátorem a kaskádami uvnitř krabiček jsou zalité náplní z tavné pistole. Po opětovné kontrole celého zapojení a stažení potenciometru na minimální hodnotu jsem připojil napájecí napětí a zdroj zapnul pomocí dvoupolohového zámku s klíčkem do polohy ON. Kilovoltmetr ukazuje hodnotu 7 kV, což odpovídá teoretickým předpokladům. Při postupném zvyšování výstupního napětí docházelo k průrazům vysokého napětí na uzemněné stínící krabičky. Proto bylo nutné ještě jednou a důkladněji zalít spoje mezi kaskádami. Po znovu zapnutí zdroje je vše v pořádku. Maximálního napětí zdroje jsem dosáhl 30 kV (v teoretickém rozboru je popsáno až 46 kV). Důvodem je, že spojením více násobících článků v kaskádách (2 kaskády za sebou) nedochází k přesnému násobení napětí na jednotlivých článcích. Fotografie zdroje na maximu je na Obr. 3.23.

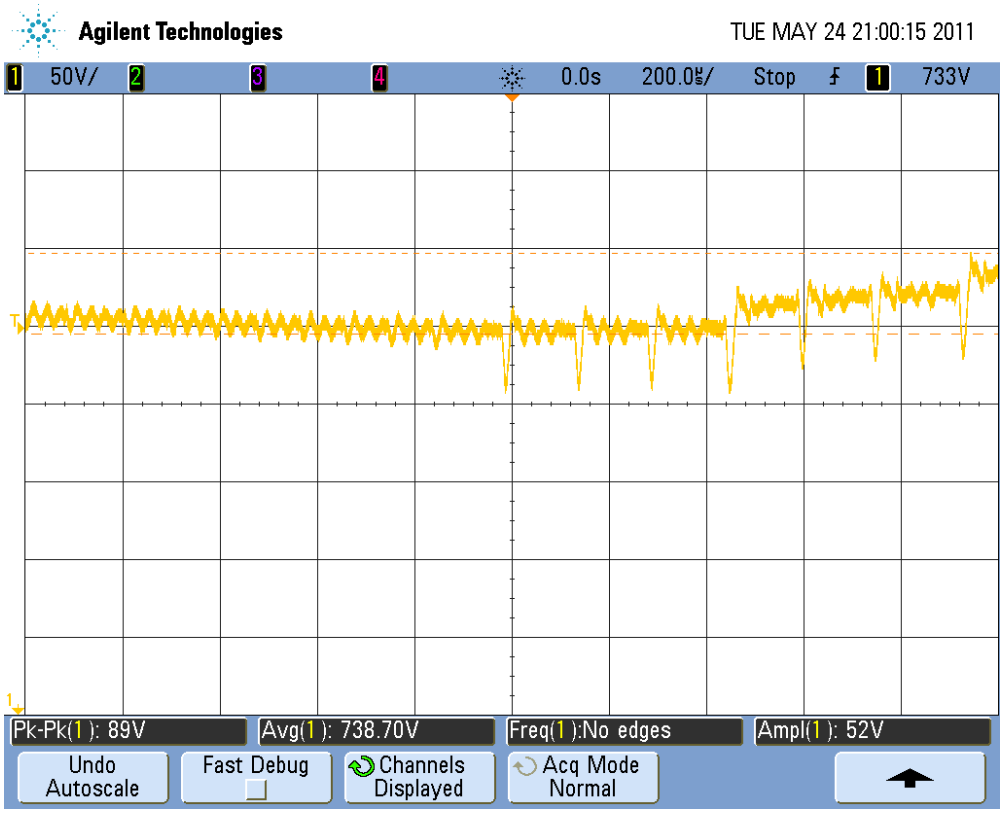


Obr. 3.23 VN zdroj na maximu

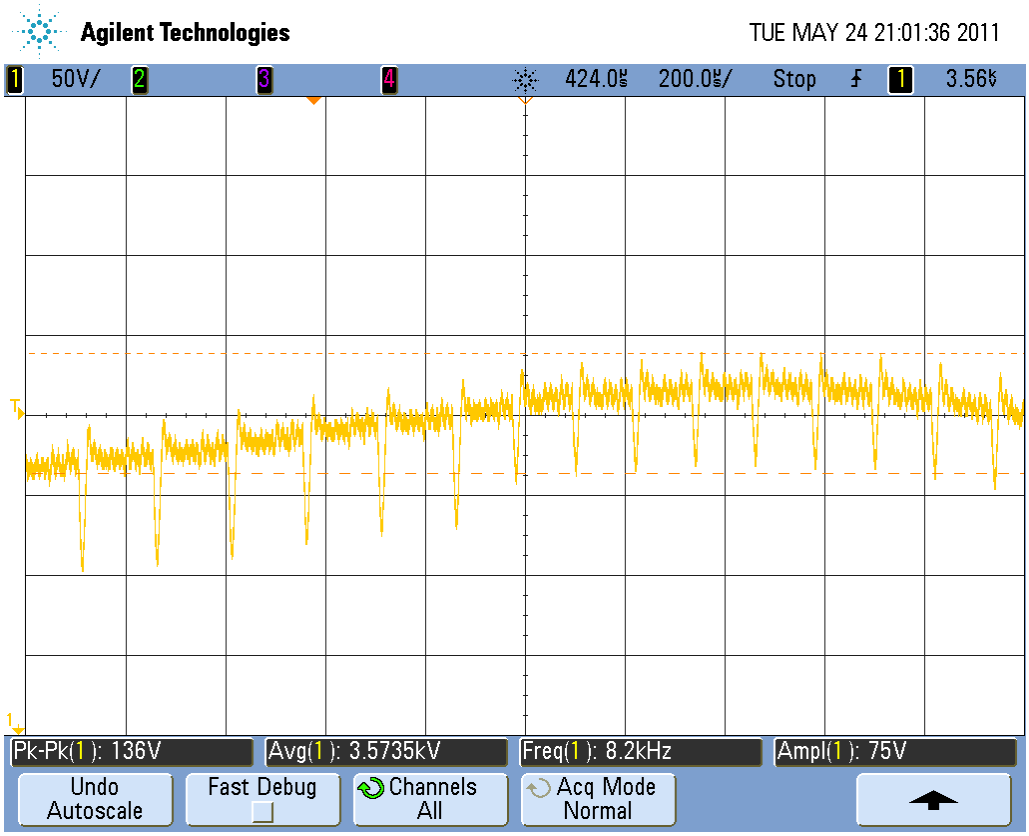
Dále jsem zkontroloval ochranný obvod před VN zdrojem s RELÉ. Stisknutím tlačítka HV OFF dojde k okamžitému vypnutí napájecího zdroje. Tlačítko je zde umístěno z důvodu bezpečnosti. Červeným tlačítkem HV ON dojde ke znovu zapnutí celého zdroje. Pokud zámek s klíčkem uvedeme do polohy OFF, celé zařízení se vypne. Zdroj funguje spolehlivě, proto můžeme přejít k samotnému měření.

3.3.2 Měření

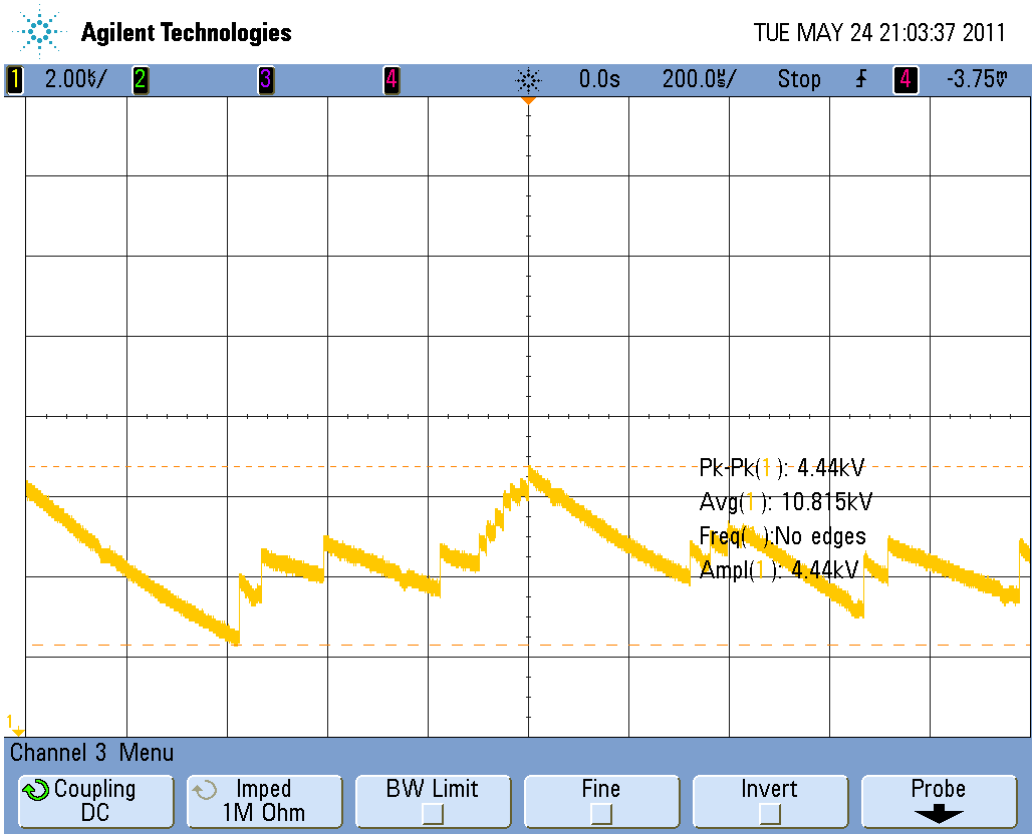
Při samotném měření jsem zdroj zatěžoval odporovým děličem 1:1 nejprve s hodnotami rezistorů R_1=R_2=100 MΩ a pomocí osciloskopu jsem měřil zvlnění výstupního napětí. Osciloskop byl připojen přes vysokonapěťovou sondu. To samé jsem zopakoval pro odporový dělič s hodnotami rezistorů R_1=R_2=1 GΩ. Obrázky zvlnění výstupního napětí z osciloskopu viz níže.



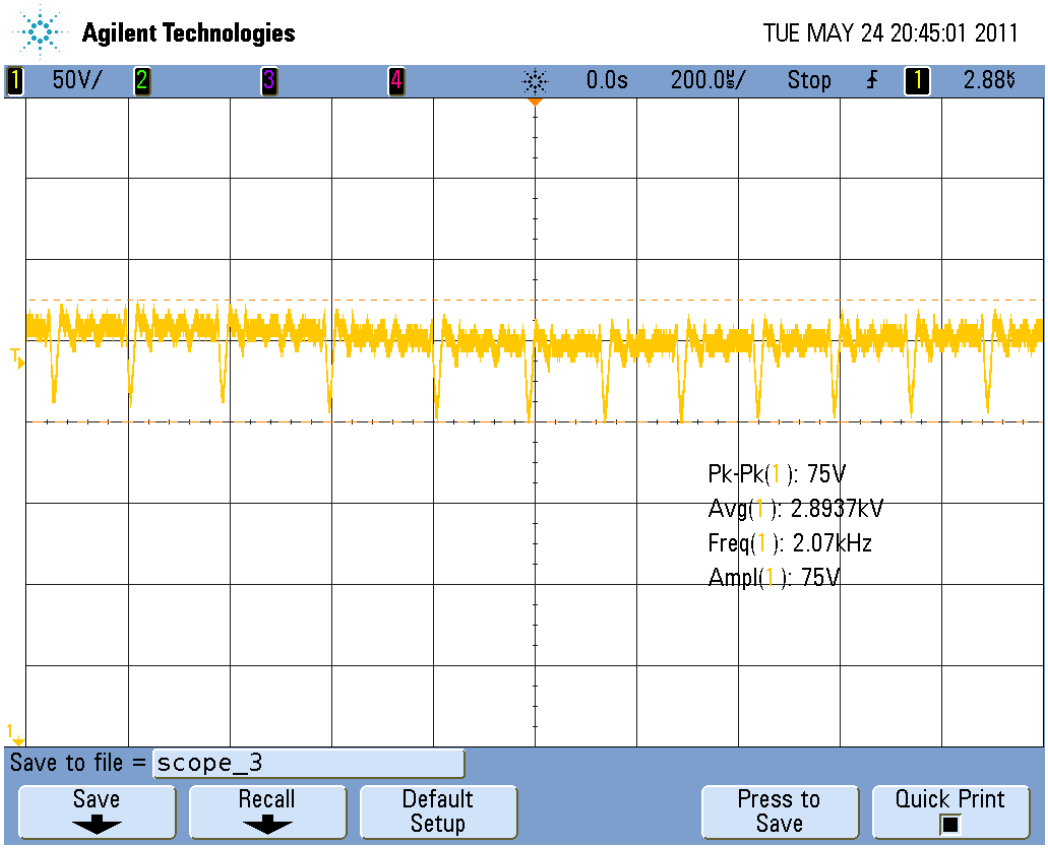
Obr. 3.24 Zvlnění výstupního napětí (dělič 1:1, R_1=R_2=1 GΩ, U_{vyst} = 10 kV)



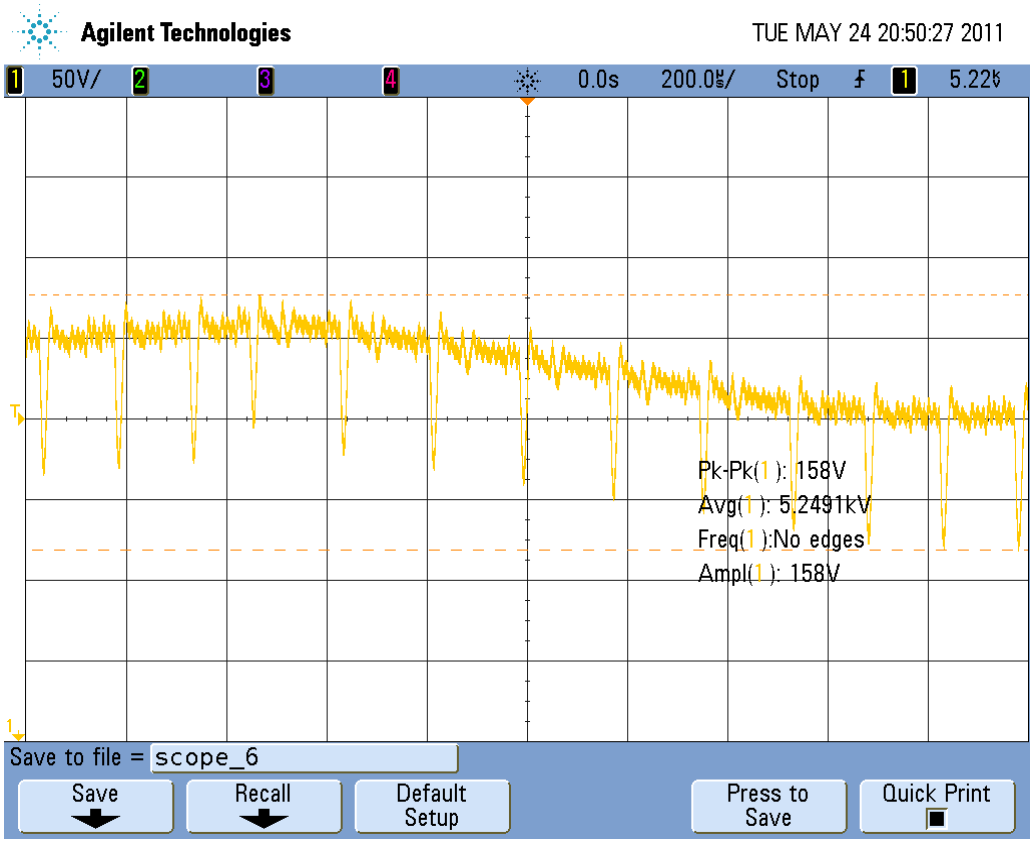
Obr. 3.25 Zvlnění výstupního napětí (dělič 1:1, R_1=R_2=1 GΩ, U_{vyst} = 20 kV)



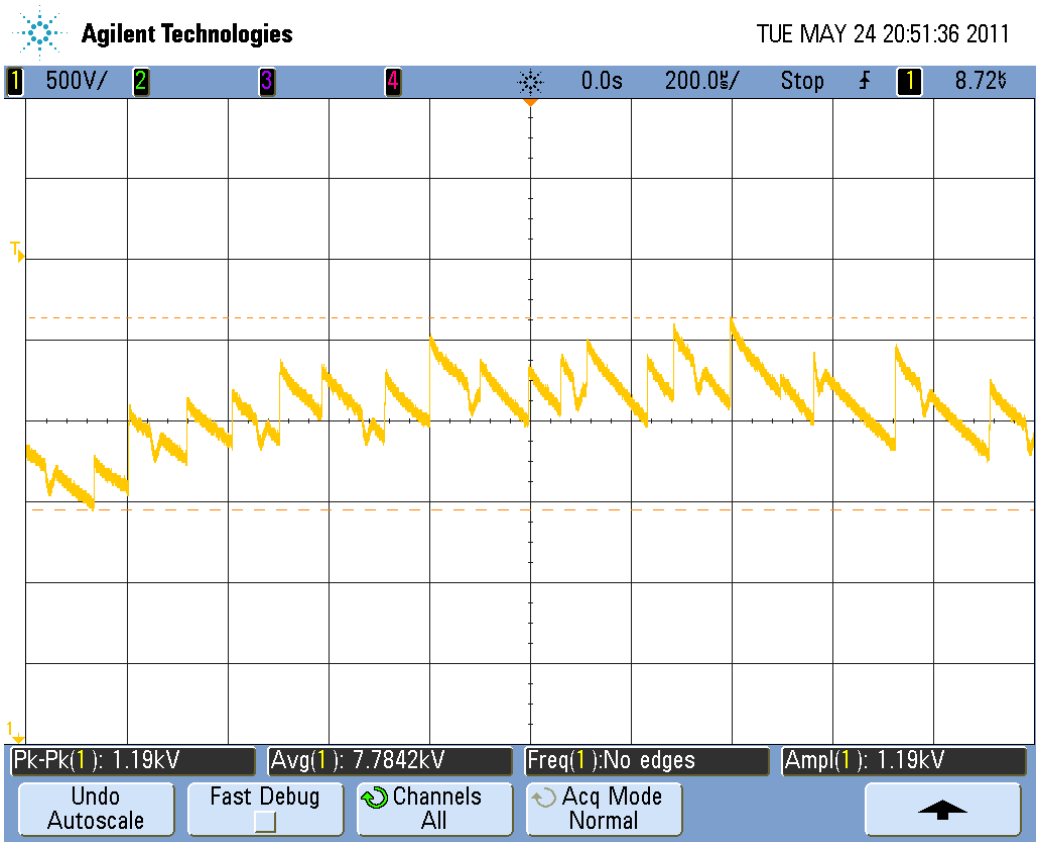
Obr. 3.26 Zvlnění výstupního napětí (dělič 1:1, R_1=R_2=1 GΩ, U_{vyst} = 30 kV)



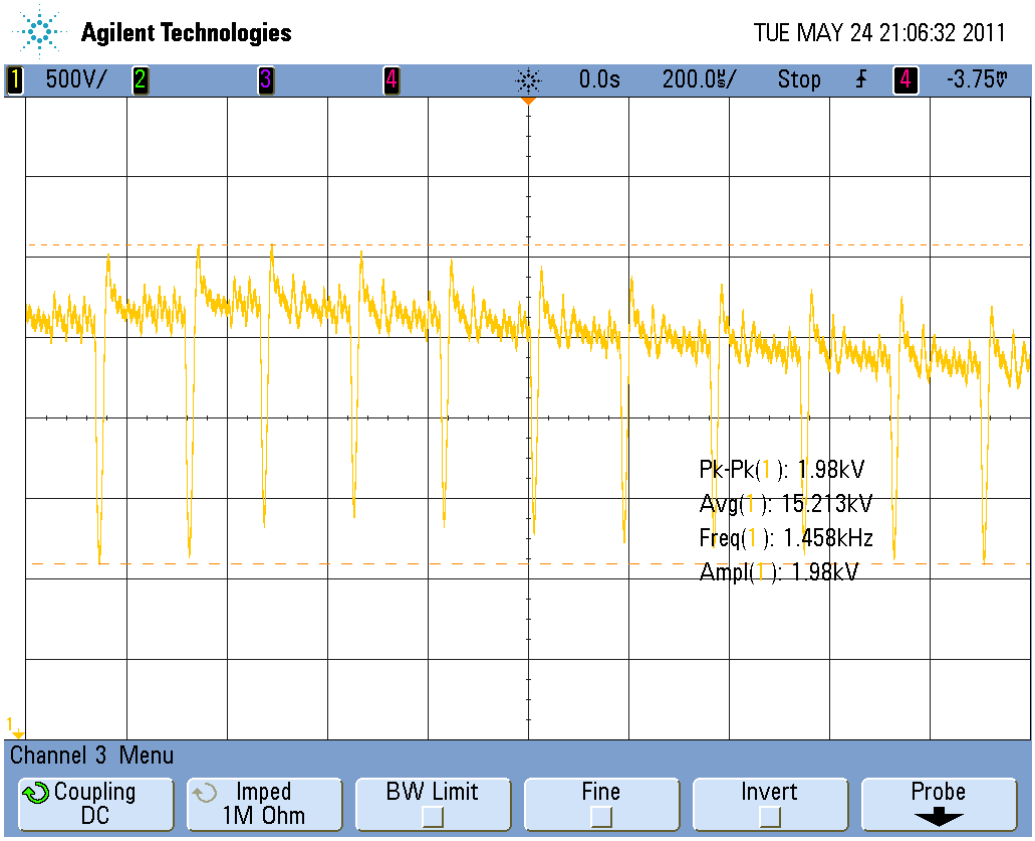
Obr. 3.27 Zvlnění výstupního napětí (dělič 1:1, R_1=R_2=100 MΩ, U_{vyst} = 10 kV)



Obr. 3.28 Zvlnění výstupního napětí (dělič 1:1, R_1=R_2=100 MΩ, U_{vyst} = 20 kV)



Obr. 3.29 Zvlnění výstupního napětí (dělič 1:1, R_1=R_2=100 MΩ, U_{vyst} = 30 kV)



Obr. 3.30 Zvlnění výstupního napětí (naprázdno, U_{vyst} = 15 kV)

Obr. 3.31 Zdroj zapojen jako generátor napěťových impulsů vysoké úrovně pro testování optických senzorů

4. Závěr

Cílem bakalářské práce je rozbor problematiky generování napěťových impulsů vysoké úrovně s krátkou dobou trvání a návrh generátoru napěťových impulsů vysoké úrovně.

V úvodu je zakresleno blokové schéma generátoru a stručné vysvětlení funkce jednotlivých bloků. V teoretickém rozboru jsou nejprve popsány tvary impulsů, konkrétně exponenciální a pravoúhlé impulsy, dále pak teoreticky rozebrány možnosti, jak realizovat jednotlivé bloky impulsního generátoru. V teoretickém rozboru je také popsán vybraný vysokonapěťový zdroj.

Hlavní náplní práce byla realizace vybraného vysokonapěťového zdroje. Přestože je v teoretickém úvodu popsán jako zdroj, jehož maximální výstupní napětí by mělo být 46 kV, prakticky se mi tohoto napětí nepodařilo docílit. Důvodem je spojení dvou televizních kaskád. Prakticky u druhé kaskády už nedochází k přesnému násobení výstupního napětí na jednotlivých článcích. Proto je výstupní napětí VN zdroje 30 kV. Jelikož je zdroj určen pro experimentální účely (konkrétně pro testování dynamických vlastností optovláknových senzorů), je výstupní napětí 30 kV bohatě postačující.

V části práce měření jsem měřil zvlnění výstupního napětí zdroje zatíženého odporovým děličem. Nejmenší zvlnění bylo naměřeno při $U_{výs}t$ = 10 kV (89 V – pro R_1=R_2=1 GΩ, 75 V – pro R_1=R_2=100 MΩ). Naopak největší zvlnění vychází při $U_{výs}t$ = 30 kV (při obou hodnotách děliče). A to v jednotkách kilovoltů. Zvlnění může být částečně způsobeno rušením sondy osciloskopu. Podle předpokladu by mělo být na výstupu napětí s hladším průběhem.

Seznam literatury

[1] WIKIPEDIE, internetový zdroj [online]. Dostupný z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kondenzátor/Civka>

[2] MAŤÁTKO, J., Praktická elektronika. Praha 2005: Idea servis, 2005. 179 s.

[3] LYSENKO, V., VN-Zdroje, *Zdroje vysokého napětí pro experimenty a pokusy*. Praha 2008 :BEN, 2008. 248 s.

[4] NOBILIS, J., Teorie elektronických obvodů (Napájecí zdroje). Elektronický učební text: SPŠE a VOŠ Pardubice.

[5] FROHN, M., OBERTHUR, H., SEIDLER, H-J., WIEMER, M., ZASTROW, P., Elektronika-polovodičové součástky. 2003. 189 s.

[6] KOLOUCH, J., BIOLKOVÁ, V., Impulzová a číslicová technika. Elektronický učební text. Brno: FEKT VUT v Brně.

[7] Http://danyk.wz.cz [online]. 28.2.2009 [cit. 2010-12-20]. Regulovatelný stabilizovaný zdroj VN 7-46kV. Dostupné: <http://danyk.wz.cz/vn_reg.html>.

[8] Www.tesla-blatna.cz, internetový zdroj [online]. 2004 [cit. 2011-05-11]. Dostupné z WWW: <http://www.tesla-blatna.cz/cs/vyrobky-rezistory.php>.

[9] SZABÓ, Z. Návrh optoelektronické metody měření koncentrace vzdušných iontů. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratky

DPS	deska plošných spojů
Cu	chemická značka mědi
ss	stejnosměrné
PFL	tvarovací vedení
VN	vysoké napětí

Symboly

kV	kilovolt – jednotka elektrického napětí
t_c	doba čela impulsu
t_t	doba týlu impulsu
t_d	zpoždění impulsu
ΔA	pokles temene impulsu
$\sigma(t)$	funkce jednotkového skoku
$x(t)$	exponenciální impuls
X_v	amplituda exponenciálního impulsu
t	čas
τ	časová konstanta
T	perioda
f	frekvence
v_f	fázová rychlost vlny
α	útlum koaxiálního vedení
R_i	vnitřní odpor
Ω	Ohm - jednotka elektrického odporu
R	elektrický odpor
Z_0	charakteristická impedance koaxiálního vedení
Z	impedance
s	činitel nasycení
U	elektrické napětí
Φ	magnetický indukční tok
I	elektrický proud
E	energie magnetického pole cívky
A	ampér – jednotka elektrického proudu
Hz	hertz – jednotka frekvence

C	kapacita kondenzátoru
ε_r	relativní permitivita
ε_0	permitivita vakua
S	plocha desek kondenzátoru
d	vzdálenost desek kondenzátoru
Q	elektrický náboj
r_1, r_2	polohové vektory
W	energie elektrického pole
L	indukčnost cívky
N	počet závitů cívky
l	délka
μ	permeabilita
φ_1-φ_2	rozdíl potenciálů

Příloha č. 1

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Grantový projekt CZ.1.07/2.2.00/07.0390 „Institut experimentálních technologií 2“

Klíčová aktivita: Výuka prostřednictvím řešení průmyslových projektů

Zadání projektu

Projektový tým:

Supervizor projektu …….	Ing. Petr Drexler, Ph.D. (drexler@feec.vutbr.cz)
Vedoucí projektu ……	Ing. Radim Kadlec (kadlec@feec.vutbr.cz)
.....	Ing. Zoltán Szabó (szaboz@feec.vutbr.cz)
Konzultant..... ……	Michal Král (michal.kral@prototypa.cz)
Student..... ……	Leoš Marek (xmarek09@stud.feec.vutbr.cz)

Zadavatel projektu:

PROTOTYPA a.s., Hudcova 533 / 78c, 612 00 Brno

Termín obhajoby: červen 2011

Název projektu: **Generátor napěťových impulsů vysoké úrovně.**

doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.
koordinátor – hlavní manažer

Brno, září 2010

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.