

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie

Návrh a konstrukce jednoduchého zdroje vysokého napětí

Lukáš Červený

Vedoucí: Doc. Ing. Vítězslav Pankrác, CSc.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Specializace: Aplikovaná elektrotechnika

Květen 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Červený** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **483811**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a konstrukce jednoduchého zdroje vysokého napětí

Název bakalářské práce anglicky:

Design and construction of a simple high voltage power supply

Pokyny pro vypracování:

1. Provést konstrukční návrh zdroje stejnosměrného vysokého napětí, který bude sloužit pro experimentální a demonstrační účely. Výstupní napětí zdroje bude nastavitelné v rozmezí 0 - 20 kV, velikost napětí bude zobrazena na čelním panelu přístroje. Napájecí napětí zdroje musí být galvanicky odděleno od sítě a nesmí přesáhnout hodnotu 24 V, výstupní proud zdroje musí být omezen na bezpečnou hodnotu.
2. Podle konstrukčního návrhu sestavit funkční prototyp zdroje.
3. Podrobným měřením ověřit dosažené parametry navrženého zdroje.

Seznam doporučené literatury:

1. Elektronické obvody a funkční bloky 1, Neumann, Uhlíř, Praha : Vydavatelství ČVUT
2. Elektronické obvody a funkční bloky 2, Neumann, Uhlíř, Praha : Vydavatelství ČVUT
3. Katalogové listy použitých elektronických součástek

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Vítězslav Pankrác, CSc., katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.02.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.05.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

doc. Ing. Vítězslav Pankrác, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji panu docentu Vítězslavu Pankráčovi za vedení práce a za poskytnutí užitečných rad a zkušeností z praxe.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Trutnově, 3. května 2021

Abstrakt

Práce se věnuje shromáždění základních informací o různých typech zdrojů napětí a vymezení funkce jejich komponent. Z různých možností je vybrána topologie zdroje vysokého napětí, jež je dostatečně efektivní, zároveň ale bezpečná a jednoduchá pro konstrukci. Podle dostupných zdrojů je vypracován návrh elektrického obvodu včetně jeho softwarové simulace v programu LTSpice. Zařízení je poté zkonstruováno. Zvolený zdroj vysokého napětí využívá IHVT transformátor z vyřazené CRT obrazovky, který je vysokofrekvenčně buzen s využitím integrovaného obvodu NE555. Měření výstupního napětí je provedeno na odporovém napěťovém děliči. Celé zařízení je napájeno ze síťového spínaného stejnosměrného zdroje napětí 24 V. Součástí konstrukce je i návrh přístrojové krabice v programu AutoCAD a tisk jednotlivých dílů na 3D tiskárně.

Klíčová slova: vysoké napětí, spínaný zdroj, IHVT transformátor, LTSpice simulace, konstrukce přístroje

Vedoucí: Doc. Ing. Vítězslav Pankrác, CSc.

Abstract

The thesis is focused on gathering basic information about different types of power sources and defining the function of their components. From various options, one topology is selected that is enough efficient, safe and simple to construct. With available sources being taken into consideration, the circuit design is created and LTSpice software simulation is made. The device is built as well. The high voltage source uses an IHVT transformer from an old CRT screen, which is high frequency excited using the NE555 integrated circuit. The output voltage is measured using a resistive voltage divider. The entire device is powered from a 24 V DC switching power source. The construction part also includes an AutoCAD design of a device box and printing its components on a 3D printer.

Keywords: high voltage, switching power supply, IHVT transformer, LTSpice simulation, device construction

Title translation: Design and construction of a simple high voltage power supply

Obsah

1 Úvod - proč zdroj vysokého napětí? 1

Část I Teoretický rozbor a simulace

2 Základní poznatky 5

2.1 Elektrické pole a napětí 5

2.1.1 Popis pomocí intenzity 5

2.1.2 Popis pomocí potenciálu 5

2.1.3 Realizace v praxi 6

2.2 Zákon elektromagnetické indukce 6

2.3 Transformátory 7

2.3.1 Napětí indukované ve vinutí 7

2.3.2 Převod transformátoru 8

2.3.3 Omezení transformátoru jeho vlastnostmi 8

3 Typy zdrojů napětí 11

3.1 Elektrostatické zdroje 11

3.2 Lineární zdroje pracující se síťovou frekvencí 13

3.3 Vysokofrekvenční pulzní zdroje 13

4 Části návrhu zdroje 17

4.1 Oddělovací síťový transformátor a usměrňovač 17

4.2 Oscilátor 18

4.2.1 Spínací tranzistor 18

4.2.2 Budící integrovaný obvod 19

4.3 Vysokonapěťový transformátor 20

4.4 Usměrňovač a kaskádní násobič napětí 20

4.5 Hotový návrh zdroje a parametry součástek 22

4.6 Chybějící součásti 22

5 Simulace se smyšlenými součástkami 23

Část II Konstrukce

6 Výsledné schéma zdroje napětí 31

7 Stavba elektronického obvodu 33

7.1 Napájení nízkým stejnosměrným napětím	33	9.1 Voltampérová charakteristika zdroje	51
7.2 Vysokonapěťový transformátor .	33	9.2 Vnitřní parametry zdroje	52
7.3 Budicí obvod transformátoru ...	36	9.3 Zvlnění výstupního napětí	52
7.3.1 Napájecí deska	36	9.4 Zhodnocení použitelnosti zdroje	56
7.3.2 Deska s oscilátorem	36		
7.3.3 Deska se spínacím tranzistorem	37		
7.4 Testovací provoz a orientační měření	37		
8 Úpravy, dokončení a kalibrace	41		
8.1 Volba primárního vinutí	41		
8.2 Regulace výstupního napětí až do nuly	42		
8.3 Měření výstupního napětí	43		
8.4 Chlazení	44		
8.5 Kalibrace	44		
8.6 Přístrojová krabice	45		
9 Měření a zhodnocení funkčnosti zdroje	51		
		Přílohy	
		A Literatura	59
		B Schémata	63

Obrázky

1.1 Blesky jsou jiskrové výboje mezi místy s rozdílem potenciálů o velikosti až desítek milionů voltů. Převzato z [Stu19].	2	4.3 Usměrňovač a měřicí odporový dělič napětí na výstupu zdroje.	21
2.1 Hysterezní smyčka vyjadřuje závislost magnetické indukce B na magnetické intenzitě H . Převzato z [Mud16].	8	4.4 Kaskádní čtyřnásobič napětí podle [Lys08], upraveno.	21
2.2 Síťový transformátor 230/24 V/50 Hz, 320 VA. Převzato z [Elf20].	9	5.1 Náhled schématu zapojení pro simulaci v programu LTSpice.	24
3.1 Holtzův třecí generátor. Převzato z [Que17].	12	5.2 Napětí U_{GS} na spínacím tranzistoru.	25
3.2 Van de Graaffův generátor. Převzato z [Lys08].	12	5.3 Napětí U_{DS} na spínacím tranzistoru.	26
3.3 Jednoduchý spínaný zdroj, který snižuje usměrněné síťové napětí.	14	5.4 Proud primárním vinutím (proud I_{DS} spínacím tranzistorem a špičkový proud ochrannou Schottkyho diodou).	26
3.4 Jednoduchý spínaný zdroj, který zvyšuje usměrněné síťové napětí.	14	5.5 Napětí (proud U_{GS} na regulačním tranzistoru.	27
3.5 Jednoduchý pulzní blokuující zdroj s vysokonapěťovým transformátorem.	15	5.6 Napětí na výstupu zdroje.	27
4.1 Zdroj stejnosměrného napětí pro další obvody.	18	7.1 Schéma vnitřního zapojení vysokonapěťového transformátoru. Převzato z [PanX1].	34
4.2 Oscilátor pro buzení vysokonapěťového transformátoru.	20	7.2 IHVT transformátor s připojeným kondenzátorem ze zkumavek, izolovaným $300M\Omega$ měřicím odporem a měděnou destičkou na uzeměném konci vinutí.	35
		7.3 Jiný pohled na transformátor.	35
		7.4 Plošný spoj s napájecími obvody.	38

7.5 Deska s oscilátorem.	38	8.11 Kompletně sestavený zdroj vysokého napětí připravený k obsluze uživatelé.	50
7.6 Spínací tranzistor s chladičem a ochranným RDC členem.	39		
8.1 Lepidlem zalité vývody vinutí IHVT transformátoru.	42	9.1 Průběh spínacích impulzů při nejvyšší hodnotě odporu potenciometru P7. 1 dílek odpovídá 1 V.	53
8.2 Omezení rozsahu potenciometru P7 rezistorem R12 (vpravo dole).	43	9.2 Průběh spínacích impulzů při střední hodnotě odporu potenciometru P7. 1 dílek odpovídá 1 V.	53
8.3 Spínaný zdroj uchycený ve své přepážce přístrojové krabice.	46	9.3 Průběh spínacích impulzů při nízké hodnotě odporu potenciometru P7. 1 dílek odpovídá 1 V.	54
8.4 Transformátor uchycený ve své přepážce přístrojové krabice.	46	9.4 Průběh nízkého nastaveného výstupního napětí. 1 dílek odpovídá 1 kV.	54
8.5 Ventilátor uchycený na boční straně přístrojové krabice.	47	9.5 Průběh středního nastaveného výstupního napětí. 1 dílek odpovídá 1 kV.	55
8.6 Boční pohled na uchycený spínaný zdroj a transformátor.	47	9.6 Průběh nejvyššího nastaveného výstupního napětí. 1 dílek odpovídá 1 kV.	55
8.7 Plošný spoj s oscilátorem, napájením měřidla a měřícím obvodem.	48		
8.8 Upevněné plošné spoje zajišťující napájení a spínání napětí na transformátoru. Čelní strana krabice je rovněž již osazena.	48		
8.9 Čelní strana krabice je upevněna do své polohy.	49		
8.10 Vrchní pohled na krabici.	49		

Tabulky

6.1 Soupis použitých součástek - 1. část.	31
6.2 Soupis použitých součástek - 2. část.	32

Kapitola 1

Úvod - proč zdroj vysokého napětí?

Podíváme-li se zpět do minulosti lidstva a jeho poznávání světa okolo sebe, přirozeně nás napadne, že lidé se setkávali s elektřinou a s elektromagnetickým polem nejprve pouze prostřednictvím jejich přírodních projevů, aniž by fyzikálními principům stojícím za těmito projevy vůbec rozuměli. Projevy magnetického pole Země (v součinnosti s dalšími fyzikálními jevy) ve formě polární záře znaly již starověké civilizace. Později se ho zvědaví lidé naučili i využívat, a tak například již staří Číňané používali kompas, který jim usnadnil orientaci.

První proniknutí do světa elektrického pole trvalo lidem o něco déle, avšak jeho projevy ve formě blesků či Eliášových ohňů jsou poměrně běžné. Tyto jevy byly a zůstávají natolik fascinujícími, že snaha o objasnění jejich příčiny vedla k mnohým experimentům a důležitým objevům z oblasti elektřiny. Vznik elektrostatického pole třením jantaru znal již řecký filozof Thales v 6. století př. n. l. Ostatně od slova jantar (řecky *élektro*) je odvozen název pro elektřinu jako takovou. [Lys08] Souvislost elektřiny s bouřkovým počasím ale dokázal až v roce 1752 americký státník se zájmem o vědu Benjamin Franklin. Experiment to byl poněkud nebezpečný - při bouřce pouštěl létajícího draka. Působení elektrostatického pole na hedvábnou šňůrku a jiskra přeskakující z kovového klíče na Franklinovu ruku však dokázaly, že bouřka je jistou formou elektrického procesu. [Kul12]

Pravděpodobně nejslavnějším experimentátorem v oblasti fyziky vůbec se o několik málo desetiletí později stal Michael Faraday. Tento Londýňan na poli britského Královského institutu a Akademie věd provedl mnoho pokusů, kterými jednak vědu popularizoval, jednak pak experimentálně dokázal pod-

Kapitola 2

Základní poznatky

2.1 Elektrické pole a napětí

2.1.1 Popis pomocí intenzity

Elektrické pole lze dobře popsat množinou vektorů elektrické intenzity \mathbf{E} , která vyjadřuje velikost a směr působení elektrické (Coulombovy) síly na jednotkový náboj umístěný v konkrétním místě \mathbf{x} .

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{F}_C(\mathbf{x})}{Q}$$

Elektrické napětí U pak představuje práci A , kterou musí vykonat vnější síla pro přesun jednotkového náboje v poli z místa \mathbf{a} do místa \mathbf{b} po křivce S , nebo energii, která se uvolní při přesunu náboje silou elektrického pole ve snaze stabilizovat energetickou bilanci.

$$U = \frac{A}{Q} = \frac{1}{Q} \int_S \mathbf{F}_C(\mathbf{x}) d\mathbf{s} = \int_S \mathbf{E}(\mathbf{x}) d\mathbf{s}$$

2.1.2 Popis pomocí potenciálu

Protože elektrické pole je polem konzervativním, výsledek nezáleží na volbě křivky, po které je myšlený náboj přemístován. To nám umožňuje každému

bodu pole přiřadit skalární hodnotu veličiny označované jako elektrický potenciál φ . Napětí mezi dvěma body pole je pak určeno jen jako jednoduchý rozdíl potenciálů v těchto bodech. Znaménková konvence je taková, že práci, kterou koná elektrické pole, je kladná.

$$U = \varphi(\mathbf{a}) - \varphi(\mathbf{b})$$

V takovém případě je pak nutno zvolit místo, které bude považováno za bod s nulovým potenciálem.

Složitější elektrická pole se nejčastěji rozdělují na více polí generovaných bodovými zdroji (náboji), jimiž způsobená elektrická intenzita je popsána přímo Coulombovým zákonem a potenciál lze snadno integrováním odvodit. Výsledná intenzita v bodě je potom dána vektorovým součtem intenzit způsobených jednotlivými bodovými náboji, výsledný potenciál je dán algebraickým součtem dílčích potenciálů.

■ 2.1.3 Realizace v praxi

V každém případě to znamená, že chceme-li vytvořit elektrické potenciálové pole s napětím mezi dvojicemi bodů, musíme alespoň v jednom bodě (zdroji elektrického pole) nahromadit kladný nebo záporný elektrický náboj. K přesunu náboje ve zdroji je zapotřebí vykonat práci. Ta se ve vztahu k jednotkovému náboji označuje jako elektromotorické napětí U_e . Tato práce může být vykonána buď mechanickým přesouváním náboje (viz tření nafukovacího balónku o vlasy), nebo působením magnetického pole tak, jak to popsal Michael Faraday.

■ 2.2 Zákon elektromagnetické indukce

Faradayův zákon elektromagnetické indukce přímo popisuje velikost elektromotorického napětí mezi vývody smyčky (závitu) tvořené vodičem jako velikost časové změny magnetického toku ϕ procházejícího smyčkou (závitem).

$$u_e(t) = -\frac{d\phi}{dt}$$

Přesun náboje ve smyčce je pak realizován indukovaným proudem, který se svým vybuzeným magnetickým tokem snaží zabránit změně magnetického

toku zvenčí (tomu odpovídá také znaménková konvence - z pohledu vnějších svorek má indukované napětí opačnou polaritu než napětí elektromotorické).

Tohoto jevu je využíváno v elektromagnetických generátorech a v transformátorech, kde je změnou magnetického toku řízeně indukováno napětí na koncích vinutí cívky. V případě generátoru je magnetický tok měněn mechanickým přesouváním zdroje magnetického pole nebo cívky. V případě transformátoru je změna magnetického toku vyvolána změnou proudu v jiné cívce ve společném magnetickém obvodu. Cívka vyvolávající změnu magnetického toku je označována jako primární vinutí, cívka, ve které je indukováno napětí se označuje jako sekundární vinutí.

2.3 Transformátory

2.3.1 Napětí indukované ve vinutí

Transformátory (jednofázové) jsou tvořeny dvěma vinutími na společném magnetickém jádru. Pro každé z vinutí transformátoru lze ze zákona elektromagnetické indukce vyjádřit velikost indukovaného napětí. Platí, že na vývodech se nachází napětí vzniklé součtem dílčích napětí indukovaných ve všech N závitů vinutí spojených v sérii. [AspX1, volně převzato a dále rozvedeno]

$$u_i(t) = -u_e(t) = N \frac{d\phi}{dt}$$

Dále uvažujme harmonický průběh napětí (nebo lépe harmonický průběh magnetického indukčního toku a tedy i magnetizačního proudu budícího vinutí).

$$u_i(t) = N \frac{d}{dt} [\sin(\omega t) \phi_{max}] = N \omega \cos(\omega t) \phi_{max}$$

Magnetický indukční tok ϕ můžeme vyjádřit pomocí velikosti magnetické indukce B , která představuje jeho plošnou hustotu v jádru (předpokládáme, že vektor magnetické indukce je kolmý na průřez jádra S_{Fe}).

$$u_i(t) = N \omega \cos(\omega t) S_{Fe} B_{max}$$

Úhlovou rychlost ω lze dále vyjádřit pomocí frekvence f a celý harmonický průběh lze převést na efektivní hodnotu, která odpovídá $1/\sqrt{2}$ násobku jeho amplitudy.

$$U_{ef} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N f S_{Fe} B_{max}$$

2.3.2 Převod transformátoru

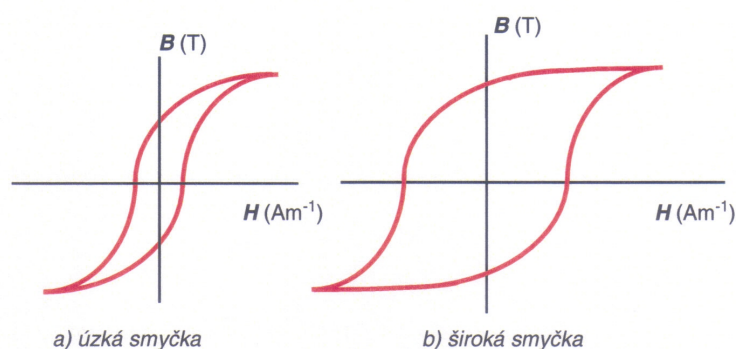
Protože jsou obě vinutí na společném jádru, předchozí rovnice vyjádřená pro každé z obou vinutí má shodné hodnoty popisující vlastnosti magnetického indukčního toku - tedy frekvenci f , plochu průřezu S_{Fe} a amplitudu magnetické indukce B_{max} . Z toho lze porovnáním takových dvou rovnic snadno zjistit převod transformátoru p .

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

Přivedením harmonického napětí na primární vedení cívky lze při znalosti převodu transformátoru snadno určit napětí indukované na jeho sekundárním vinutí. Převod napětí je jedním z hlavních důvodů konstrukce transformátorů. Uvažujeme-li ideální transformátor beze ztrát, přenášený výkon z primárního vinutí na sekundární bude stejný. Proudů ve vinutích pak budou transformovány v opačném poměru než napětí. Tato skutečnost je druhým z hlavních důvodů konstrukce transformátorů.

2.3.3 Omezení transformátoru jeho vlastnostmi

Amplituda magnetické indukce B_{max} je omezena magnetickými vlastnostmi jádra. Toto omezení je patrné z hysterezní smyčky znázorňující závislost velikosti magnetické indukce v materiálu na velikosti magnetické intenzity (vyvolané proudem budícího vinutí). Při dosažení mezní hodnoty magnetické indukce dojde k nasycení materiálu (všechny magnetické domény jsou již natočeny podle směru intenzity) a tuto hodnotu nelze dále zvýšit.

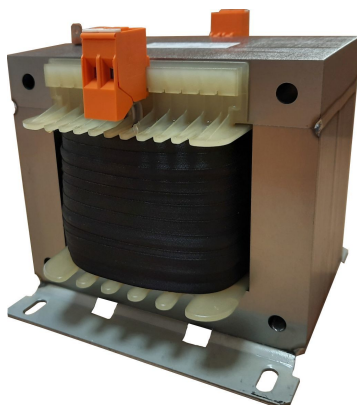


Obrázek 2.1: Hysterezní smyčka vyjadřuje závislost magnetické indukce B na magnetické intenzitě H . Převzato z [Mud16].

V praxi se však pracuje s hodnotami sycení magnetického jádra poměrně menšími, než představuje horní mez nasycení. Je tomu tak především proto, že závislost $B = f(H)$ se dá dobře aproximovat lineární funkcí v okolí nuly (viz případ úzké hysterezní smyčky) a převod transformátoru je pak také lineární. Při dosažení určité meze nasycení dojde ke zkreslení výstupních hodnot oproti vstupním. Navrhnout transformátor s širší oblastí lineární magnetizace je konstrukčně i finančně náročnější.

Průřez jádra je dán přenášeným výkonem, aby se transformátor nepřehříval. Velikost průřezu jádra transformátoru pracujícího se síťovým napětím ($f = 50\text{Hz}$) je úměrná přibližně odmocnině z příkonu: $S_{Fe} \doteq 1,2\sqrt{P_1}$. [Bur11] Se zvětšováním výkonu při síťové frekvenci roste průřez jádra a spolu s ním i délka a objem vinutí. To vede ke zvětšení transformátoru, zvýšení jeho hmotnosti a v neposlední řadě ke zvýšení pořizovací ceny. Počet závitů jednotlivých vinutí je pak dán jmenovitými napětími, na které je transformátor dimenzován.

Zbývající proměnnou při konstrukci transformátoru je pracovní frekvence f . Frekvence napětí v distribuční síti (50 Hz) je na poměry transformátorů vcelku malá. Velikost, hmotnost i cenu transformátoru při zachování výkonu lze snížit právě při použití vyšší budící frekvence (v řádu desítek kHz). Pro buzení takového transformátoru je však třeba použít přídavnou elektroniku.



Obrázek 2.2: Síťový transformátor 230/24 V/50 Hz, 320 VA. Převzato z [Elf20].

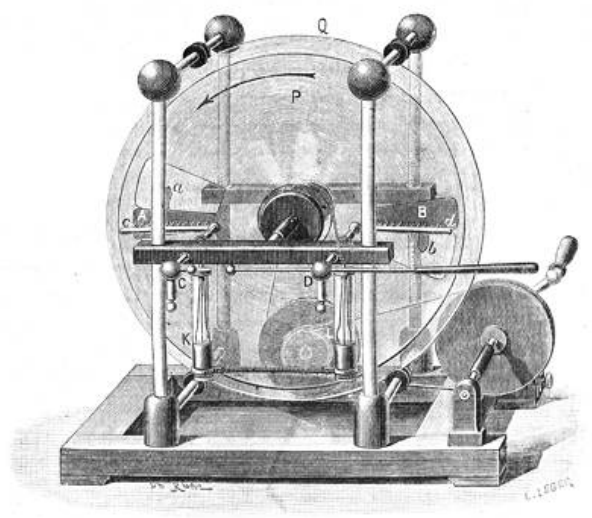
Kapitola 3

Typy zdrojů napětí

3.1 Elektrostatické zdroje

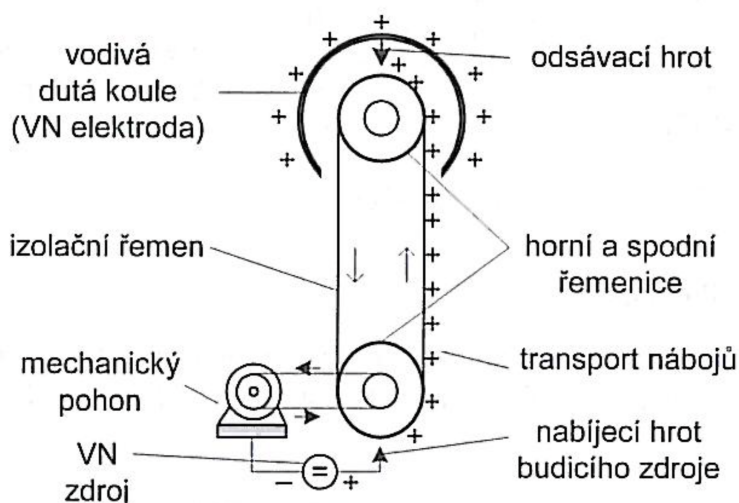
Historicky první zdroje napětí byly založeny na akumulaci kladného či záporného elektrického náboje získaného třením. Vlivem tření různých materiálů například o kožešinu dojde k uvolnění elektronů z jednoho povrchu a jejich přichycení k povrchu druhému. Tak na třeném předmětu převáží kladný či záporný náboj (je-li třena skleněná tyč, pak se nabije kladně, naopak ebonitová tyč se nabije záporně). [Lys08]

Příkladem zdroje napětí založeného na tomto principu je Holtzův třecí generátor. Ten je tvořen dvěma kotouči. Jeden z nich je v zafixované poloze a je tvořen dvěma povrchy oddělenými vodorovně průměrem tohoto kotouče. O pevný disk je třen disk rotující, který se v jedné polovině nabíjí kladně a ve druhé záporně (v závislosti na povrchu, o který je daná část disku v té chvíli třena). V místech přechodu do opačného povrchu jsou umístěny sběrací hroty, které odvádí kladný a záporný náboj z rotujícího disku na vývody zdroje. Napětí mezi vývody roste do chvíle, než přeskočí jiskra, anebo než dojde ke ztrátám korunou. [Que17]



Obrázek 3.1: Holtzův třecí generátor. Převzato z [Que17].

Dalším příkladem elektrostatického zdroje může být Van de Graaffův generátor. Ten ke svému chodu potřebuje pomocný zdroj stejnosměrného napětí. Samotný generátor je tvořen řemenem, který slouží pro sběr a přenos náboje z hrotu pomocného zdroje, a kulovou vysokonapěťovou elektrodou, do které je druhým hrotem náboj sbírán a akumulován. Takový zdroj může poskytnout napětí až 10 MV. [Lys08]



Obrázek 3.2: Van de Graaffův generátor. Převzato z [Lys08].

Ačkoliv elektrostatických generátorů byla popsána celá řada a dobře tyto generátory posloužily v začátcích experimentování s elektřinou, jejich nasazení

v současnosti není (mimo demonstrativní účely a místa, kde je třeba aplikovat opravdu velmi vysoké napětí v řádu MV) praktické. Regulace napětí není snadná a jejich funkčnost závisí na vlhkosti vzduchu a mechanickém opotřebením jednotlivých součástí. Mnohem vyšší spolehlivost poskytují řešení založená na strojích elektromagnetických.

3.2 Lineární zdroje pracující se sítovou frekvencí

V současnosti, kdy je elektřina průmyslově vyráběna a distribuována, je dostupné střídavé síťové fázové napětí 230 V/50 Hz prakticky všude. Výhodou střídavého napětí je snadná možnost jeho transformace nahoru či dolů. Velkých výkonových transformátorů je využíváno v distribuční soustavě. Menších transformátorů je možné využít i pro laboratorní účely nebo pro napájení běžných spotřebních elektrických zařízení.

Konstrukce zdroje napětí pracujícího se sítovou frekvencí je velmi jednoduchá. Takový zdroj může být realizován prakticky i samostatným síťovým transformátorem a usměrňovačem na jeho výstupu. Regulaci vstupního (a tím i výstupního) napětí lze pro pokusné potřeby nejjednodušeji, avšak ztrátově nebo za cenu špatného účinníku provádět odporovým nebo kapacitním děličem.

Ačkoliv lineární zdroje napětí jsou konstrukčně velmi jednoduché a nepotřebují ke své práci další elektroniku, v současnosti nepatří mezi nejrozšířenější. To především kvůli rozměrům, hmotnosti a nákladům na výrobu transformátoru, které rostou s nároky na přenášený výkon, jak již bylo diskutováno dříve.

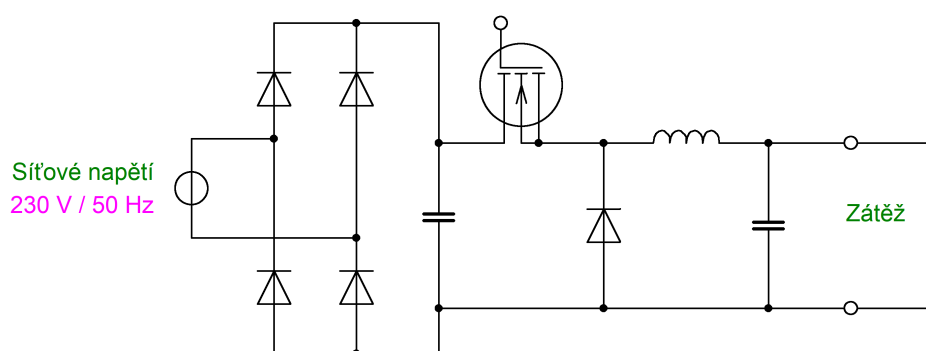
3.3 Vysokofrekvenční pulzní zdroje

Prakticky veškerá spotřební elektronika dnešní doby je napájena vysokofrekvenčními spínanými zdroji. Pracují na principu usměrnění síťového napětí a následně pulzně šířkové modulaci. Jako spínače zde fungují tranzistory (nejčastěji MOSFET) řízené k tomu určenými integrovanými obvody.

Snižující spínané zdroje jsou velmi běžnou záležitostí. Nalezneme je prakticky v každé mobilní nabíječce či jiném podobném kompaktním zdroji.

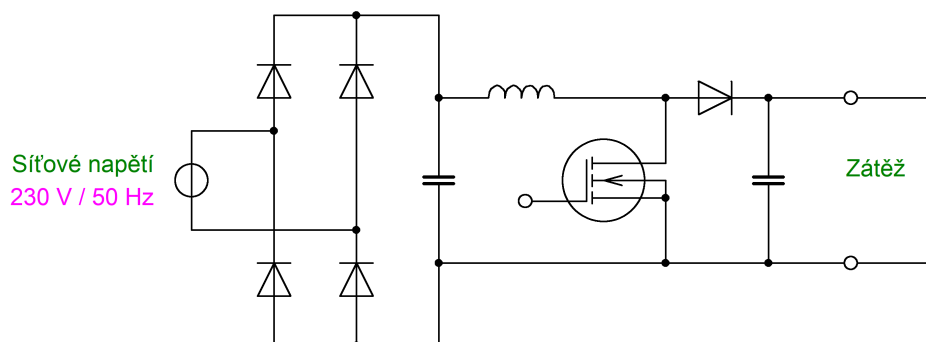
Usměrněné síťové napětí je střídavě spínáno a vypínáno a v závislosti na poměru doby sepnutí a rozepnutí se mění střední hodnota výstupního napětí. Ze schématu je patrné, že při trvale rozepnutém spínači se na zátěži neobjeví žádné napětí a v případě trvale sepnutého spínače lze na zátěži získat plné napětí z usměrňovače.

Aby nedocházelo k přerušování proudu zátěží, je využíváno indukčnosti a její schopnosti akumulovat magnetickou energii, která slouží jako zdroj proudu při rozepnutí spínače. Dioda pak vytvoří proudovou cestu ve chvíli, kdy je spínač rozepnutý.



Obrázek 3.3: Jednoduchý spínaný zdroj, který snižuje usměrněné síťové napětí.

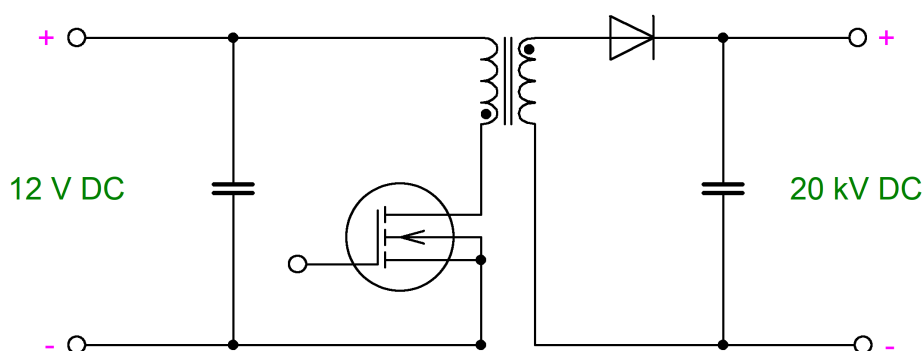
S pomocí stejných součástí v jiném zapojení lze sestavit také zvyšující spínaný zdroj. Při trvale rozepnutém spínači se indukčnost chová jako zkrat a na zátěži se objeví čisté napětí z usměrňovače. Při sepnutí spínače se na indukčnosti objeví plné napětí z usměrňovače bez zátěže v cestě a proud v ní rychle naroste. Po rozepnutí spínače indukčnost vybíjí naakumulovanou energii dodáváním proudu do zátěže. Na zátěži se vlivem toho objeví větší napětí.



Obrázek 3.4: Jednoduchý spínaný zdroj, který zvyšuje usměrněné síťové napětí.

V případě zvyšujícího měniče je dioda otevřena prakticky po celou dobu provozu, a to buď napětím z usměrňovače, nebo proudem z indukčnosti. Tranzistorový spínač je tedy namáhán výstupním napětím. Odtud plyne omezení pro nejvyšší dosažitelné výstupní napětí zdroje. Současné tranzistory jsou schopny spínat napětí v řádu stovek V.

V případě, že je požadavek na vyšší výstupní napětí, je potřeba přistoupit k zapojení s vysokonapěťovým transformátorem. Takové transformátory jsou k nalezení například ve starších CRT obrazovkách, kde slouží k urychlení elektronů. Jejich napájecí napětí se pohybuje v řádu nižších desítek V, výstupní napětí je pak v řádu nižších desítek kV. Aby byl transformátor efektivně využit, je vhodné jej budit vysokou frekvencí (již zmíněné obrazovky pracují s frekvencí přesahující 15 kHz), k čemuž opět poslouží MOSFET spínač řízený integrovaným obvodem.



Obrázek 3.5: Jednoduchý pulzní blokující zdroj s vysokonapěťovým transformátorem.

Typů takových zdrojů existuje hned několik. Výše znázorněný zdroj se označuje jako blokující měnič a je založen na podobném principu jako zvyšující stejnosměrný měnič bez transformátoru. Ve chvíli, kdy je spínač sepnut, protéká primárním vinutím transformátoru proud a energie je akumulována v magnetickém obvodu (proud na sekundární straně neteče kvůli usměrňovací diodě). Po rozeptnutí spínače se energie uvolňuje. Protože indukčnost neumožní skokovou změnu proudu, otočí se na vinutích napětí, které tuto změnu vyrovnává. Aby mělo napětí na výstupu správnou orientaci vůči usměrňovací diodě, musejí být vinutí na transformátoru vedena vůči sobě opačným směrem, což je ve schématu naznačeno tečkami. Spínací tranzistor je vhodné chránit před vzniklým přepětím. [DanX1, Kle15]

Jiné zdroje jsou stavěny na principu takovém, že proud v sekundárním vinutí transformátoru teče současně s proudem na primární straně. Takové zdroje

se nazývají propustné. Některé využívají jen kladnou půlperiodu spínaného napětí (v rozepnutém stavu je pak energie rekuperována zpět pomocným vinutím transformátoru), jiné využívají obě. Taková zapojení pak vyžadují dva anebo čtyři tranzistorové spínače a primární vinutí transformátoru je zapojeno jako v polomůstku nebo v úplném můstku. Takové zdroje jsou vhodné pro aplikace s vyšším výkonem než zdroje blokující. Pro lepší představu lze chápat blokující měnič jako pumpu, která ukládá energii do magnetického obvodu a později ji pošle dál, naproti tomu propustný měnič se chová, jako kdyby energii přímo přelával. [DanX1]

Propustné zdroje jsou však konstrukčně náročnější, a to jak v oblasti budících obvodů, tak v požadavcích na stavbu transformátoru, který zpravidla musí mít více vinutí kvůli rekuperaci energie v rozepnutém stavu. Důležitými aspekty jsou také přenášený výkon, který z hlediska bezpečnosti musí (a postačuje) být malý, a velikost napájecího napětí. Aby byl zdroj relativně bezpečný, neměly by být obvody na primární straně vysokonapěťového transformátoru napájeny sítovým napětím, které však propustné zdroje vyžadují k dosažení dostatečně velkých výstupních napětí.

Pro konstrukci laboratorního zdroje vysokého napětí tedy bude vhodné držet se myšlenky blokujícího měniče, který

- pracuje na vysoké frekvenci a efektivně využívá transformátor při jeho malých rozměrech,
- je konstrukčně jednoduchý, vyžaduje pouze jeden spínací tranzistor a jemu příslušný budící obvod,
- je napájen bezpečným stejnosměrným napětím, vyššího napětí na primární straně dosahují pouze špičky na indukčnosti primárního vinutí transformátoru,
- energii dávákuje, takže přenáší malý a relativně bezpečný výkon.

Kapitola 4

Části návrhu zdroje

Zvolený blokující měnič lze rozdělit do několika částí podle jejich funkce. Protože je napájen stejnosměrným bezpečným napětím, je třeba na začátek zařadit oddělovací síťový transformátor s usměřovačem (nebo zdroj napájet jiným laboratorním zdrojem napětí, případně bateriemi zapojenými v sérii).

Protože je transformátor buzen vysokofrekvenčním střídavým signálem, je prakticky celý zbývající obvod na jeho primární straně tvořen oscilátorem sestávajícím z výkonového spínače (tranzistoru) a jeho budícího obvodu (integrováný obvod).

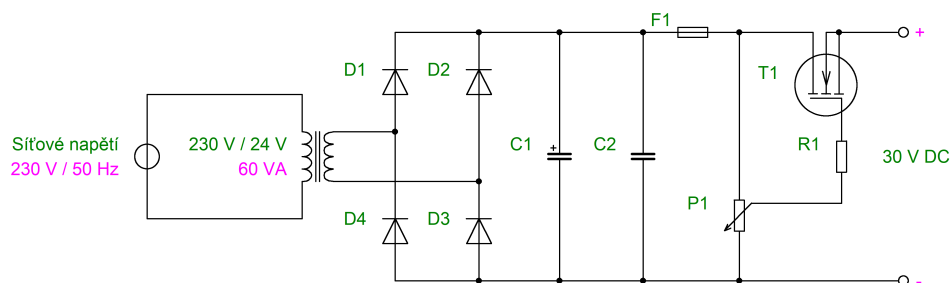
Na sekundární straně transformátoru je třeba napětí usměrnit a vyhladit. Dále je třeba získané vysoké napětí měřit. Ačkoliv se dá velikost vysokého napětí odhadnout podle délky elektrického oblouku, který lze mezi výstupními elektrodami udržet zažehnutý, bude vhodné na výstup paralelně zařadit také odporový dělič pro měřicí účely.

4.1 Oddělovací síťový transformátor a usměřovač

Z požadavku na bezpečnost plyne nutnost galvanicky oddělit napájení zdroje od síťového napětí. K tomu poslouží malý síťový transformátor 230 V/24 V, který je běžně dostupný. Výkon transformátoru není potřeba velký, což opět vychází z požadavků na bezpečnost. Má-li být napětí na výstupu zdroje 20

kV a proud omezený na přijatelně bezpečnou hodnotu pod 3 mA [Kos13], výkon zdroje nebude velký: $P = 20 \text{ kV} \cdot 3 \text{ mA} = 60 \text{ VA}$. Tento výkon však nebude odebírán trvale, zdroj bude pracovat většinu času naprázdno.

Transformované napětí je usměrněno klasickým diodovým můstkovým usměrňovačem. Kondenzátory C1 a C2 slouží k vyhlazení napájecího napětí a k filtraci možných zánějů vznikajících dále v obvodu. Na kondenzátorech se ustálí napětí o velikosti mírně přesahující 30 V (odpovídá špičkovému napětí harmonického průběhu s efektivní hodnotou 24 V po odečtení úbytků na diodách). V obvodu je také zařazen regulátor výkonu (omezovač proudu) složený z tranzistoru T1, rezistoru R1 a trimru P1 pro pozdější připojení vysokonapěťového transformátoru. Napájení lze opatřit pojistkou F1. [Bro04] Parametry všech součástek budou diskutovány na závěr.



Obrázek 4.1: Zdroj stejnosměrného napětí pro další obvody.

4.2 Oscilátor

Usměrněné napětí bude přivedeno na vysokonapěťový transformátor, avšak ten je třeba budít poměrně vysokou frekvencí. Často se užívá obvodů pracujících na frekvenci 15,625 kHz (staré CRT televize) nebo výše (až 25 kHz). Jako spínač poslouží N-kanálový MOSFET tranzistor, který bude buzen impulzy z integrovaného obvodu. Dobře dokumentovaný a prakticky vyzkoušený integrovaný obvod je NE555. [Bro04, DanX2, Šle13, Whi09]

4.2.1 Spínací tranzistor

Jako spínač bude použit N-kanálový MOSFET tranzistor (ve schématech T2). Ten umožňuje spínat napětí mezi kanály drain a source (U_{DS}) o velikosti až

stovek voltů přivedením poměrně malého napětí (mezi 10 a 20 V) na kanál gate (U_{GS}).

Možnost spínání vyšších napětí je vhodná, protože na indukčnosti primárního vinutí transformátoru se při rozepnutí tranzistoru indukují napěťové špičky, které by mohly slabší tranzistor poškodit. Konkrétní funkční aplikace využívají tranzistory o maximálním napětí U_{DS} 400-500 V. [Bro04, Ok15] Napěťové špičky je možné omezit zapojením ochranného RDC členu (ve schématech R6, D6 a C7). [DanX3] Velikost napěťové špičky pak lze měnit použitým odporem R6.

4.2.2 Budící integrovaný obvod

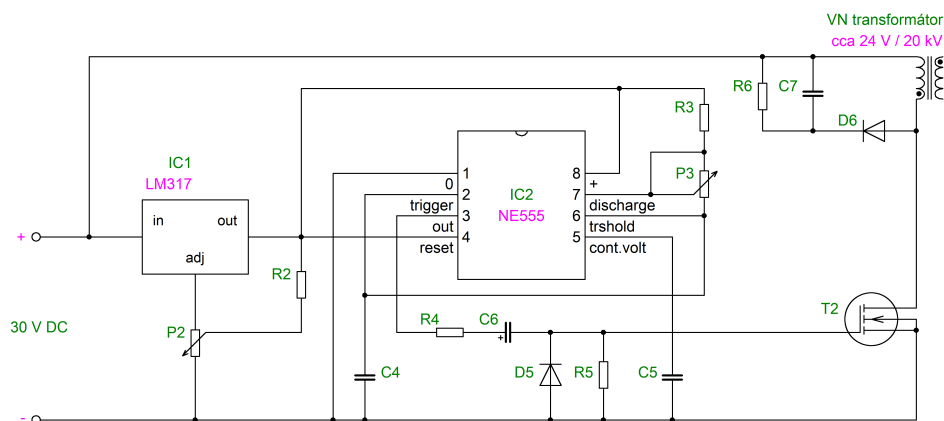
K buzení tranzistoru bude použit integrovaný obvod NE555 pro svou ověřenou funkčnost v již existujících instalacích. Pro napájení oscilátoru je použit stabilizátor a regulátor napětí LM317T, a to z toho důvodu, aby nedocházelo ke kolísání napájení oscilátoru při zatížení zdroje. Umožňuje také potenciometrem P2 nastavit hodnotu napájecího napětí integrovaného obvodu tak, aby se zbytečně nepřehříval. [Bro04, Kos14]

Samotný integrovaný obvod NE555 je pak zapojen tak, že potenciometr P3 slouží k nastavení frekvence, jakou je generován signál pro spínání tranzistoru. Tímto potenciometrem bude obvod později laděn tak, aby vysokonapěťový transformátor měl na výstupu co největší napětí. [Bro04] Frekvence f a střída (poměr mezi dobou sepnutí a rozepnutí) D signálu jsou určeny velikostí odporů R3 a P3 a velikostí kapacity C4. [StřX1]

$$f = \frac{1}{C_4(R_3 + 2P_3) \ln 2}$$

$$D = 1 - \frac{P_3}{R_3 + 2P_3}$$

Takto zapojený obvod na výstupu (pin č. 3 označený *Output*) generuje obdélníkový signál se střídou $D \geq 0,5$. [StřX1] Vhodnější pro buzení transformátoru je signál impulsního charakteru tak, aby doba, kdy je tranzistor rozepnutý byla co nejdelší. Transformátor potřebuje čas, aby v něm stihlo zaniknout magnetické pole a magnetický obvod se nepřesycoval. Takový tvar signálu zajišťují rezistory R4 a R5, dioda D5 a kondenzátor C6 zapojené mezi výstup integrovaného obvodu a hradlo spínacího tranzistoru T2. [Bro04]



Obrázek 4.2: Oscilátor pro buzení vysokonapětového transformátoru.

4.3 Vysokonapětový transformátor

Nejsnazší cesta k získání vysokonapětového transformátoru bude nějaký takový odpájet ze staré CRT obrazovky, kde původně sloužil k urychlování elektronů. Velmi staré televize obsahují transformátory se čtvercovým jádrem a vinutími naproti sobě. Některé z nich mohou obsahovat i kaskádní násobič napětí na výstupu (namísto usměrňovací diody). V některých případech je vhodné u takových transformátorů pro potřeby konstrukce zdroje vysokého napětí převinout primární vinutí. [Mas05]

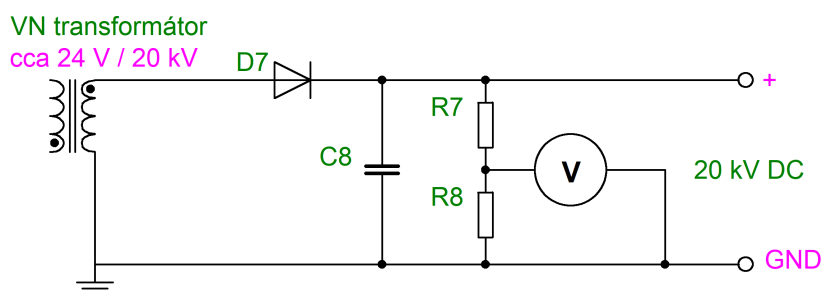
Novější CRT obrazovky obsahují takzvané IHVT (*integrated high voltage transformer*) transformátory s větším počtem vinutí, která slouží pro napájení dalších obvodů v obrazovce. Bývají válcová na jádru ve tvaru hranatého písmene D a zalitá v izolantu. Celý transformátor je uložen v černém pouzdře. Může mít na výstupu usměrňovací diodu a filtrační kondenzátor, někdy i odporový dělič s vývody anebo kaskádní násobič napětí. IHVT transformátory mívají větší množství vývodů a proto může být obtížnější identifikovat potřebné konce vinutí a jejich správnou polaritu. [Bro04, DanX4, Whi09]

4.4 Usměrňovač a kaskádní násobič napětí

V závislosti na stavbě transformátoru je možné uspořádat obvod na jeho sekundární straně různými způsoby. Pokud transformátor obsahuje usměrňovací

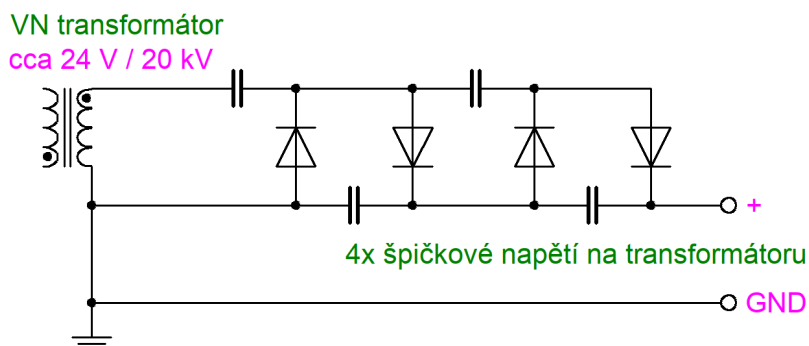
diodu, je možné na jeho výstup z hlediska stabilizace napětí zařadit prakticky jen filtrační kondenzátor. Kvůli vysokému napětí bude pravděpodobně nutné si vysokonapěťový kondenzátor vyrobit. [Ele01]

Na výstup je vhodné zařadit také odporový dělič pro měření výstupního napětí. Bude-li mít celý dělič dostatečně velký odpor, půjde pravděpodobně omezit jím protékající proud na minimum a jen mírně ovlivnit výstupní napětí zdroje v důsledku toho, že se jedná o poměrně měkký zdroj. Pro přesnější měření bude při návrhu takového děliče třeba počítat s vnitřním odporem voltmetru. Regulaci výstupního napětí bude vhodné provádět přímou regulací vstupního napětí, a to buď s pomocí laboratorního zdroje napětí, nebo zařazením kapacitního nebo ztrátového odporového děliče na výstup síťového transformátoru.



Obrázek 4.3: Usměrňovač a měřicí odporový dělič napětí na výstupu zdroje.

Pokud transformátor neobsahuje usměrňovací diodu, na jeho výstupu se objevují napěťové špičky kladné i záporné polarity. Toho lze využít pro zapojení kaskádního násobiče napětí. Ten je tvořen sérií diod a kondenzátorů. Funguje na principu postupného nabíjení kondenzátorů prostřednictvím diod z kladné i záporné napěťové špičky. Na sérii kondenzátorů se objeví znásobené usměrňené napětí. [Lys08]



Obrázek 4.4: Kaskádní čtyřnásobič napětí podle [Lys08], upraveno.

4.5 Hotový návrh zdroje a parametry součástek

Přiložené schéma č. 1 vyobrazuje hotový návrh blokujícího zdroje vysokého napětí. Zbývá doplnit parametry součástek. V obvodu usměrňovače napájecího napětí dobře poslouží například usměrňovací diody BY251. Důležitý je zde požadavek na maximální odebíraný proud s rezervou, tedy alespoň $I_F \geq 3A$. Elektrolytický kondenzátor C1 je v již existujících řešeních [Bro04, Kos14] zvolen 2,2 mF/35 V. Filtrační kondenzátor C2 volí [Kos14] s kapacitou 150 nF. Maximální proud pojistkou je dán výkonem síťového transformátoru: $I_F \leq 60 \text{ VA}/30 \text{ V} = 2 \text{ A}$.

Pro regulátor výkonu uvádí [Bro04] tranzistor IRFP448. Hodnoty odporů v zapojení jeho hradla jsou potom $P1 = 47 \text{ k}\Omega$ a $R1 = 220 \Omega$.

V obvodu stabilizátoru napětí mají podle [Kos14] součástky hodnoty následující: $P2 = 5 \text{ k}\Omega$, $R2 = 240 \Omega$ a $C3 = 1 \text{ uF}$. Pro oscilátor jsou pak parametry součástek podle [Bro04] následující: $R3 = 1 \text{ k}\Omega$, $P3 = 10 \text{ k}\Omega$, $C4 = 15 \text{ nF}$ a $C5 = 100 \text{ nF}$. Na výstupu NE555 je použita dioda 1N4007, odpory $R4 = 10 \Omega$, $R5 = 1 \text{ k}\Omega$ a kondenzátor $C6 = 100 \mu\text{F}/16 \text{ V}$.

Spínací tranzistor je rovněž IRFP448. Ochranný RDC člen je tvořen rychlou diodou - například výkonová Schottkyho dioda STPSC8H065, kondenzátorem $C7 = 100 \text{ nF}$ a odporem $R6 = 100 \text{ k}\Omega$. Parametry kondenzátoru C7 a rezistoru R6 byly empiricky vyzkoušeny simulací, která bude popsána vzápětí.

4.6 Chybějící součásti

Doposud vypracovaný návrh zdroje vysokého napětí má prozatím několik nedořešených záležitostí. Ty bude možné vyřešit až podle měření a pokusů v průběhu konstrukce, a proto buď nejsou zaneseny ve schématu č. 1, nebo v případě, že jsou, je možné, že dojde k jejich úpravě. Jedná se především o

- regulaci a omezení spínaného napětí,
- zapojení sekundární strany vysokonapěťového transformátoru,
- zapojení panelového měřicího zařízení,
- případný ventilátor potřebný pro chlazení.

Kapitola 5

Simulace se smyšlenými součástkami

Před přípravou komponent a samotnou konstrukcí je vhodné provést alespoň pro orientaci simulaci v počítačovém programu. Dají se díky ní nalézt problémová místa v obvodu a pomůže například i při dimenzování součástek. Simulace pro konstruovaný vysokonapěťový zdroj je provedena ve volně dostupném programu LTSpice vyvíjeném společností Analog Devices, Inc. [Ana20]

Tento simulátor nabízí přehledné uživatelské prostředí, ve kterém se schéma sestavuje myší z dostupných komponent. Disponuje poměrně širokou nabídkou různých modelů komponent s rozmanitými vlastnostmi co nejvíce se blížícími reálným součástkám. Přesto zůstává nevýhodou, že většina použitých komponent je softwarem považována za ideální (například vodiče mají nulový odpor, rezistory nemají parazitní kapacitu a indukčnost, diody nevykazují zpoždění při zotavení, ...). Rovněž v případě vysokého napětí nejsou brány v úvahu ztráty korunou a podobně.

Režimů simulace program LTSpice nabízí několik. Pro tuto aplikaci bude užitečná simulace v časové oblasti. Pomocí neomezeného množství virtuálních sond pak lze při ní sledovat průběh napětí v libovolném uzlu nebo proud protékající libovolnou součástkou.

Pro účely simulace byl namísto síťového transformátoru a usměrňovače použit zdroj stejnosměrného napětí 30 V, a to z toho důvodu, že ve chvíli, kdy je v obvodu uzemněn záporný výstup můstkového usměrňovače a jeho napájení „visí ve vzduchu“, simulace je velmi náročná na výpočetní prostředky a zabere velké množství času i na výkonném počítači. Ostatní součástky jsou použity

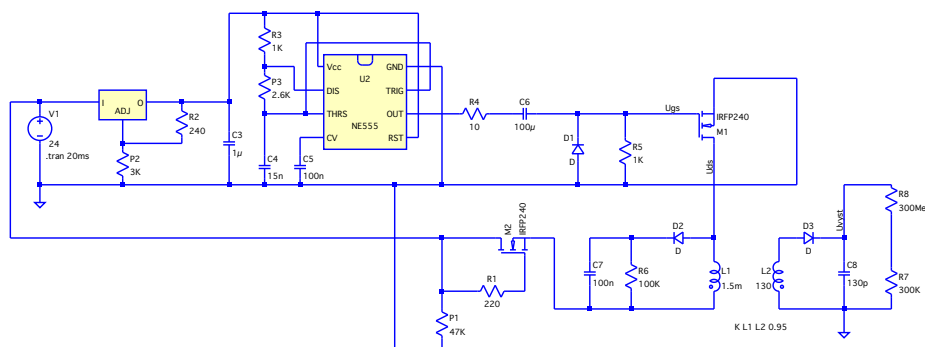
podle schématu zapojení z předchozí kapitoly. Pouze MOSFET tranzistory byly nahrazeny jiným typem, neboť knihovna LTSpice typ IRFP448 nenabízí. Potenciometry byly nahrazeny rezistory s hodnotami odporu odpovídajícími reálně nastaveným potenciometrům.

Vysokonapěťový transformátor je v LTSpice simulován pomocí dvou cívek s magnetickou vazbou. Koeficient této vazby je u ideálního transformátoru 1 (ve skutečnosti je nižší, jeho význam postihuje skutečnost, že magnetický tok obou cívek není dokonale společný a existuje i magnetický tok rozptylový). Pro potřeby simulace byl koeficient vazby zvolen 0,95. Velikosti vlastních indukčností cívek byly hrubě odhadnuty z typických mechanických a magnetických vlastností transformátoru podle známého fyzikálního vztahu. [ReV21]

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 S}{l}$$

N představuje počet závitů cívky, S plochu průřezu jádra a l délku cívky (počet závitů krát průměr vodiče).

Na sekundární stranu transformátoru je zařazena usměrňovací dioda (je simulován transformátor IHVT s integrovanou usměrňovací diodou), filtrační kondenzátor a odporový dělič pro měření napětí.

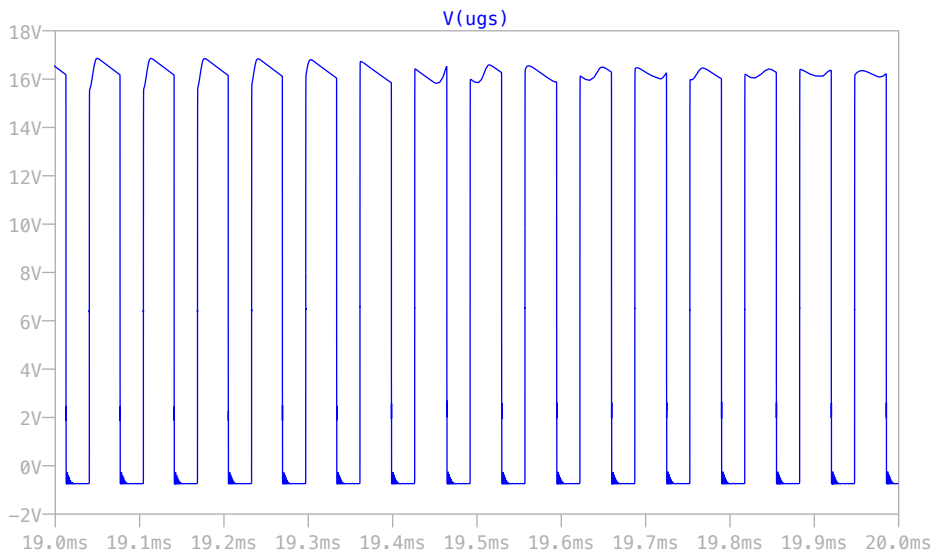


Obrázek 5.1: Náhled schématu zapojení pro simulaci v programu LTSpice.

Pro ověření funkčnosti a informační hodnotu při konstrukci zdroje budou sledovány průběhy napětí U_{GS} na spínacím tranzistoru (budící signál - je

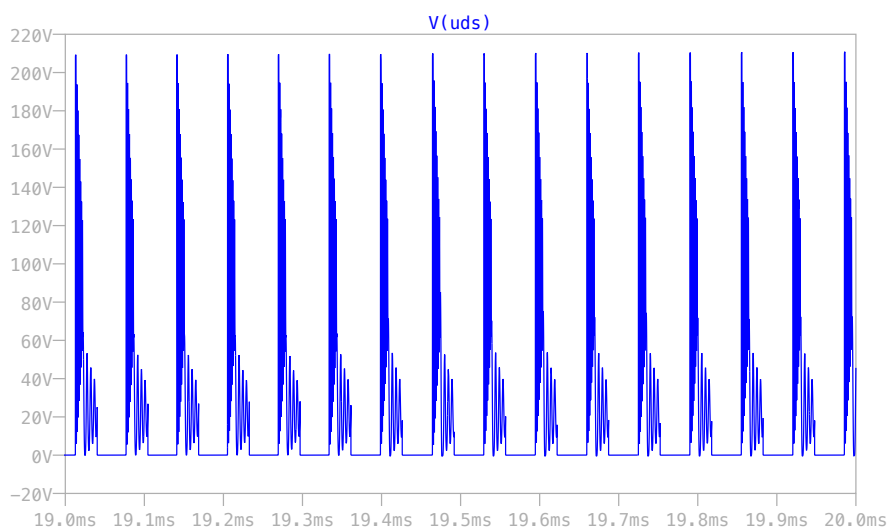
třeba kontrola jeho frekvence pro správné buzení transformátoru a amplitudy pro dostatečné otevření tranzistoru. Frekvenci lze nastavit potenciometrem P3, amplitudu změnou napájecího napětí ze stabiliztoru potenciometrem P2), U_{DS} na tomtéž tranzistoru (aby napěťové špičky z indukčnosti nepoškodily tranzistor), proud primárním vinutím cívky (resp. proud spínacím tranzistorem a ochrannou Schottkyho diodou), napětí U_{GS} na regulátoru výkonu a usměrněné napětí.

Frekvence budícího signálu je s příslušným nastavením potenciometru P3 přibližně 15,5 kHz (15,5 period za 1 ms), což je v pořádku. Amplituda signálu mezi 16 V a 18 V je také v pořádku. Výkonové MOSFET tranzistory bezpečně spínají při překročení hodnoty 10 V a shora bývají omezeny hodnotou 20 V (stejně je tomu i u navrženého tranzistoru IRFP448).



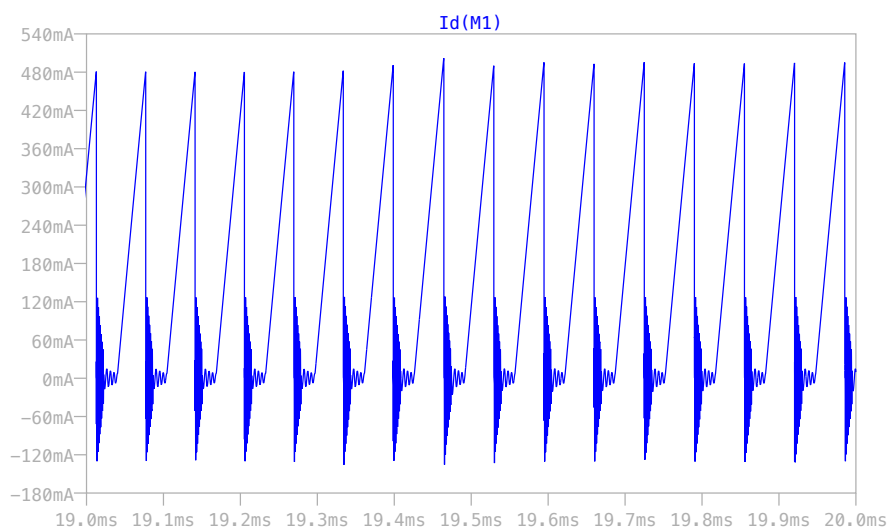
Obrázek 5.2: Napětí U_{GS} na spínacím tranzistoru.

Napěťové špičky na indukčnosti jsou v této konfiguraci menší než 220 V. Tranzistor IRFP448 by měl podle specifikací odolat napětí až 500 V. To je tedy rovněž v pořádku.

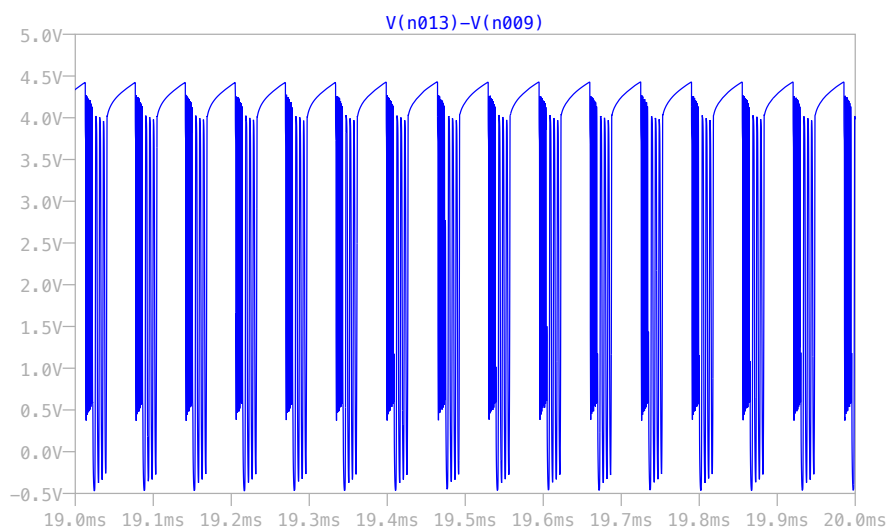


Obrázek 5.3: Napětí U_{DS} na spínacím tranzistoru.

Proud primárním vinutím narůstá na hodnotu 480 mA. To odpovídá přípustným mezím pro tranzistory i diodu. Regulátor výkonu se v tomto případě ani neprojevívá. Napětí U_{GS} na něm nabývá hodnoty přibližně 4,5 V (jak je patrné z dalšího obrázku) a při takové hodnotě podle specifikací propouští proud přibližně 2 A.

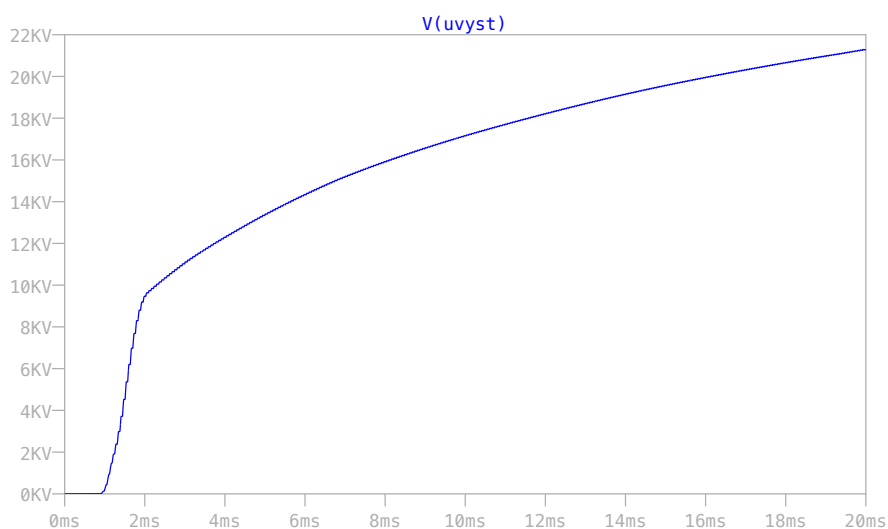


Obrázek 5.4: Proud primárním vinutím (proud I_{DS} spínacím tranzistorem a špičkový proud ochrannou Schottkyho diodou).



Obrázek 5.5: Napětí (proud U_{GS} na regulačním tranzistoru.

Na následujícím obrázku je vidět průběh napětí na výstupu zdroje. Poměrně rychle je překonána hranice požadovaného napětí 20 kV.



Obrázek 5.6: Napětí na výstupu zdroje.

Je nutné znovu zdůraznit, že simulace pracuje s idealizovanými modely a parametry transformátoru byly pouze odhadnuty. Nelze moc dobře předvídat,

zdali se zkonstruovaný zdroj skutečně bude chovat tak, jak ukazují výsledky simulace. Nelze ani moc dobře předvídat chování zdroje při zátěži například hořícím elektrickým obloukem.

Podle transformátoru, který bude použit ke konstrukci zdroje, bude pravděpodobně nutné přizpůsobit některé komponenty. To platí především pro obvod na jeho sekundárním vinutí. Je možné, že bude třeba zapojit kaskádní násobič napětí.



Část II

Konstrukce

Kapitola 6

Výsledné schéma zdroje napětí

Následující text se bude odkazovat vedle schématu č. 1 také na příložené schéma č. 2, které dokumentuje skutečně realizovaný zdroj vysokého napětí. Při konstrukci byly některé součástky vynechány nebo naopak přidány, číslování součástek však bylo pro přehlednost zachováno a odpovídá schématu číslo 1.

Následující tabulka představuje seznam součástek ve schématu č. 2 a jejich typ, který byl při konstrukci zvolen. Typ součástek byl volen s ohledem na parametry uvedené v kapitole 4.5 podle aktuální nabídky obchodníků s elektronickými komponenty.

Značka	Součástka	Typ / Stručný popis
-	Spínaný zdroj	230 V, 75 W AC / 24 V, 3,2 A DC
-	Vysokonapěťový transformátor	KFT3AB398F
C3	Elektrolytický kondenzátor	1 μ F, 100 V
C4	Keramický kondenzátor	15 nF, 50 V
C5	Keramický kondenzátor	100 nF, 100 V
C6	Elektrolytický kondenzátor	100 μ F, 100 V
C7	Keramický kondenzátor	100 nF, 100 V
C8	Výkonový kondenzátor	přibližně 130 pF
C9	Elektrolytický kondenzátor	1 μ F, 100 V
C10	Elektrolytický kondenzátor	1 μ F, 100 V
D5	Schottkyho dioda	40 V, 2 A
D6	Schottkyho dioda	600 V, 4 A
D7	Sériově řazené diody	integrované v transformátoru

Tabulka 6.1: Soupis použitých součástek - 1. část.

Značka	Součástka	Typ / Stručný popis
F1	Pojistka	3,15 A, rychlá
F2	Vratná pojistka	0,1 A, 60 V
F3	Bleskojistka	470 V, 20 kA
IC1	Stabilizátor napětí	LM317T 1,2-37 V
IC2	Časovač	NE555P
IC3	Stabilizátor napětí	LM388T
IC4	Stabilizátor napětí	LM317T 1,2-37 V
M	Ventilátor	24 V, 1,8 W
P1	Cermetový trimr	47 k Ω , 0,5 W, lineární
P2	Cermetový trimr	5 k Ω , 0,5 W, lineární
P3	Cermetový trimr	10 k Ω , 0,5 W, lineární
P4	Potenciometr	5 k Ω , 0,2 W, lineární
P5	Cermetový trimr	5 k Ω , 0,5 W, lineární
P6	Cermetový trimr	5 k Ω , 0,5 W, lineární
P7	Potenciometr	100 k Ω , 0,2 W, lineární
P8	Cermetový trimr	500 k Ω , 0,5 W, lineární
R1	Rezistor	220 Ω , 1 W
R2	Rezistor	220 Ω , 1 W
R3	Rezistor	1 k Ω , 1 W
R4	Rezistor	10 Ω , 1 W
R5	Rezistor	1 k Ω , 1 W
R6	Rezistor	100 k Ω , 1 W
R7	2 rezistory v sérii	2 \times 150 M Ω , 2 \times 2 W
R9	Rezistor	300 Ω , 2 W
R10	Rezistor	220 Ω , 1 W
R11	Rezistor	430 k Ω , 0,6 W
R12	Rezistor	33 k Ω , 0,6 W
SW1	Kolébkový spínač	1 A / 250 V
T1	N MOSFET tranzistor	IRF740PBF
T2	N MOSFET tranzistor	IRF740PBF
V	Digitální voltmetr	0-199,9 V DC, napájení 9-12 V DC

Tabulka 6.2: Soupis použitých součástek - 2. část.

Kapitola 7

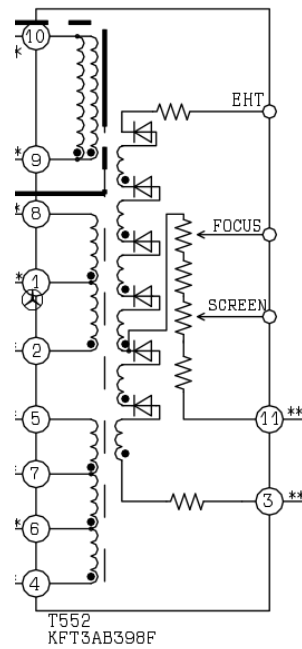
Stavba elektronického obvodu

7.1 Napájení nízkým stejnosměrným napětím

Původně bylo zamýšleno napájet konstruovaný zdroj vysokého napětí za pomoci oddělovacího síťového transformátoru a usměrňovače (viz kapitola 4.1). Vzhledem k poměrně vysokým cenám síťových oddělovacích transformátorů 230 V / 24 V byla zvolena alternativa a celý napájecí obvod byl nahrazen jedním stabilizovaným spínaným zdrojem stejnosměrného napětí 24 V. Ve schématu tak byl celý napájecí obvod včetně diodového můstku D1-4 a filtru C1-2 nahrazen jedním stejnosměrným zdrojem.

7.2 Vysokonapěťový transformátor

První součástí, která byla získána pro další pokusy, byl vysokonapěťový transformátor. Na sběrném dvoře byl nalezen televizor Panasonic TX-21AP1P, z něhož byl odpájen a vymontován transformátor KFT3AB398F. Jedná se o integrovaný vysokonapěťový transformátor s větším množstvím primárních i sekundárních vinutí. Sekundární strana obsahuje integrované usměrňovací diody. Vnitřní zapojení transformátoru je vyobrazeno v servisním manuálu k televizoru. [PanX1]

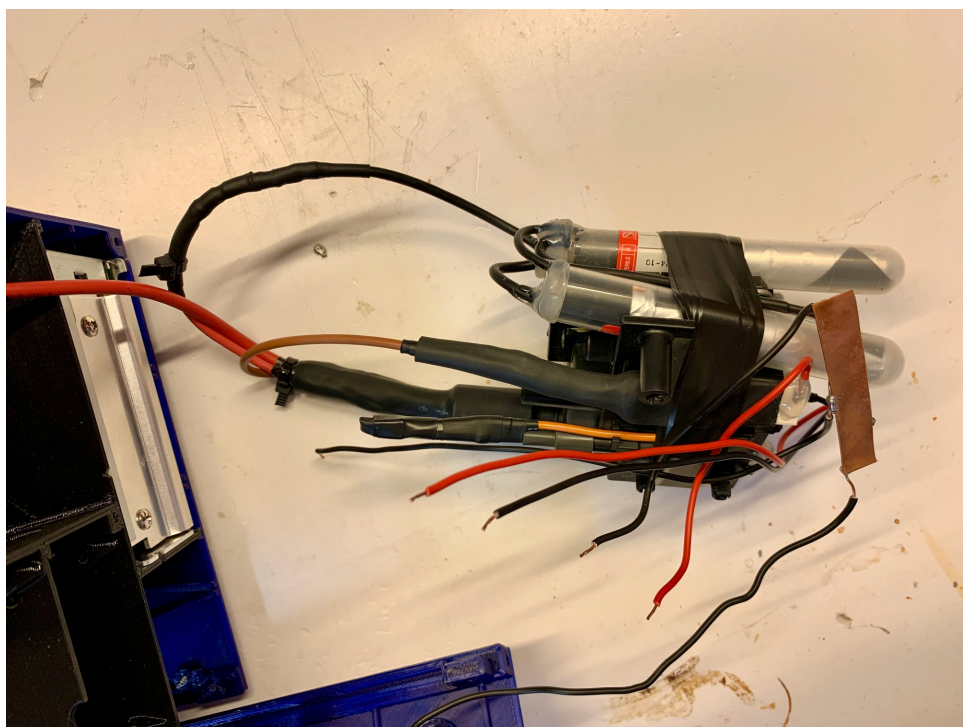


Obrázek 7.1: Schéma vnitřního zapojení vysokonapětového transformátoru. Převzato z [PanX1].

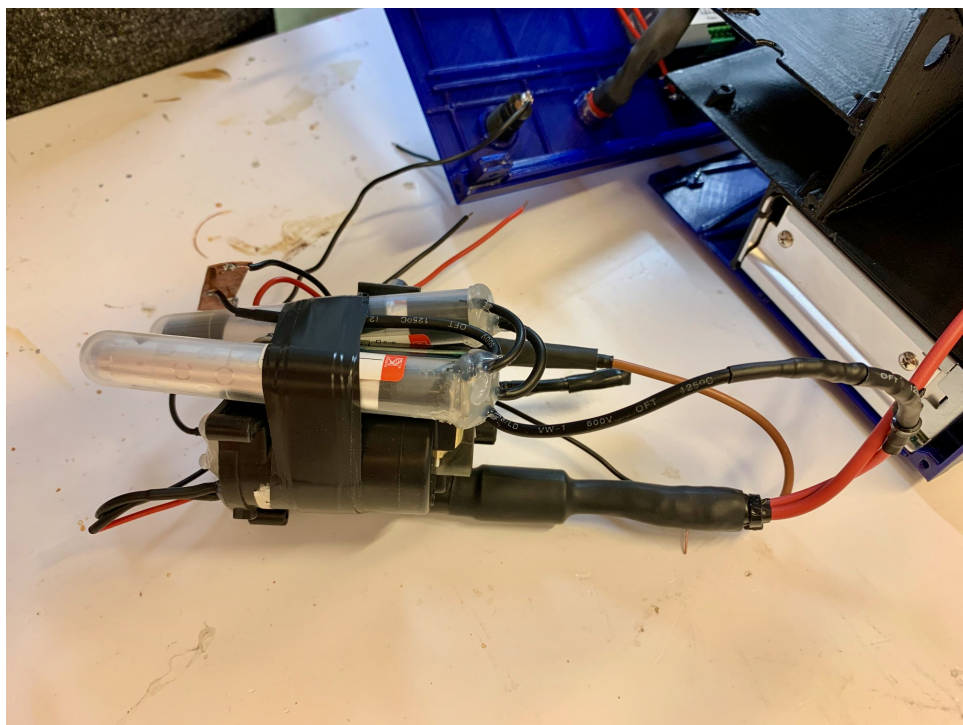
Vývody hlavního primárního vinutí byly identifikovány podle [DanX4]. Protože sekundární strana obsahuje zapojené usměrňovací diody (zalıte uvnitř transformátoru), není možné uvažovat o kaskádním násobiči, a tak byl na sekundární vinutí zapojen filtrační kondenzátor sestavený z plastových lékařských zkumavek a alobalu (C8). Tento kondenzátor má podle měření multimetrem kapacitu přibližně 130 pF.

Paralelně byl připojen také odpor R7 složený ze série dvou 150M Ω výkonových rezistorů. Pro jednoduché měřicí účely v průběhu pokusů se zdrojem při jeho konstrukci byl do série k němu přidán 300k Ω rezistor (prozatím namísto P8), na kterém by měl být měřen přibližně 0,001 násobek napětí na filtračním kondenzátoru (při použití voltmetru s dostatečně vysokým vnitřním odporem).

Záporný pól sekundárního vinutí byl uzeměn (na ochranný kolík zásuvky) a byla k němu připájena měděná destička pro připájení dalších potřebných vodičů. Transformátor s doplněnými prvky je vyobrazen na obrázcích 7.2 a 7.3. Izolace pájených spojů a vodičů byla provedena tavným lepidlem a několika vrstvami teplem smršťované bužírky. Pro testování transformátoru bylo později třeba sestavit budicí obvod.



Obrázek 7.2: IHVT transformátor s připojeným kondenzátorem ze zkumavek, izolovaným $300\text{M}\Omega$ měřicím odporem a měděnou destičkou na uzeměném konci vinutí.



Obrázek 7.3: Jiný pohled na transformátor.

7.3 Budicí obvod transformátoru

Pro ověření funkčnosti transformátoru bylo třeba jej budit vysokofrekvenčním spínáním nízkého napětí. Podle návrhu v kapitole 4.5 a schématu č. 1 byl tedy sestaven prakticky celý prototyp zdroje vysokého napětí (se změnou napájení a použitím konkrétních součástek zmíněných výše).

Současně byl také před regulační tranzistor T1 podle schématu č. 2 zapojen další stabilizátor napětí LM338T (IC3) s příslušnými obslužnými komponenty (R9, P4 a C9), který slouží k nastavení velikosti spínaného napětí potenciometrem P4. Stabilizátor LM338T dle katalogových listů umožňuje na svém výstupu odebírat vyšší proud než stabilizátor LM317T. [Tex13, Vis02]

Později byl paralelně k potenciometru P4 připojen trimr P5 pro nastavení rozsahu potenciometru P4. Oba mají velikost odporu 5 k Ω , nejvyšší možný odpor celé kombinace je tak 2,5 k Ω . Spínané napětí je pak možno dle orientačního měření řídit v rozsahu do přibližně 20 V.

Elektronický obvod byl pájen na třech univerzálních deskách plošných spojů. Jejich propojení bylo provedeno vodiči upevněnými ve šroubových svorkovnicích.

7.3.1 Napájecí deska

První z desek plošných spojů je připojena na výstup napájecího zdroje. Obsahuje pojistku F1, regulační obvod IC3 se svorkami pro vyvedení potenciometru P4 a regulační tranzistor (omezovač proudu) T1. Protože se regulátor a tranzistor později při provozu významně zahřívaly, byly opatřeny chladiči. Obvod je vyfocen na obrázku 7.4.

7.3.2 Deska s oscilátorem

Druhá z desek plošných spojů obsahuje obvod časovač NE555P. V její části je umístěn také regulační obvod IC4 doplněný podle schématu č. 2, který slouží k napájení panelového měřidla a zobrazovače výstupního napětí. Přítomen je

také měřicí obvod výstupního napětí, který bude popsán později. Deska je vyfocena na obrázku 7.5.

7.3.3 Deska se spínacím tranzistorem

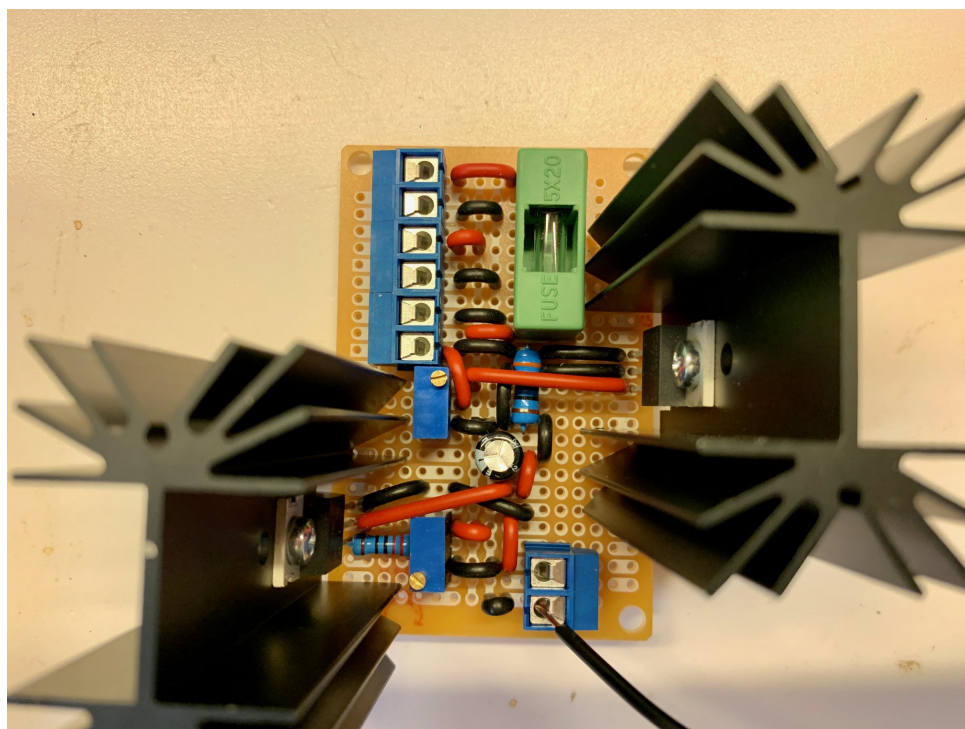
Třetí osazená deska plošných spojů obsahuje prakticky jen spínací tranzistor T2 a ochranný RDC člen. Obsahuje také svorkovnici pro přijetí primárního vinutí transformátoru. Je napájena přes vypínač SW1 podle schématu č. 2, aby mohl být transformátor odpojen od napájecího napětí a na jeho výstupu nebylo nic indukováno. To je vhodné například pro určitá měření nebo pro bezpečnost po připojení napájecího zdroje k síti. Deska je vyfocena na obrázku 7.6.

7.4 Testovací provoz a orientační měření

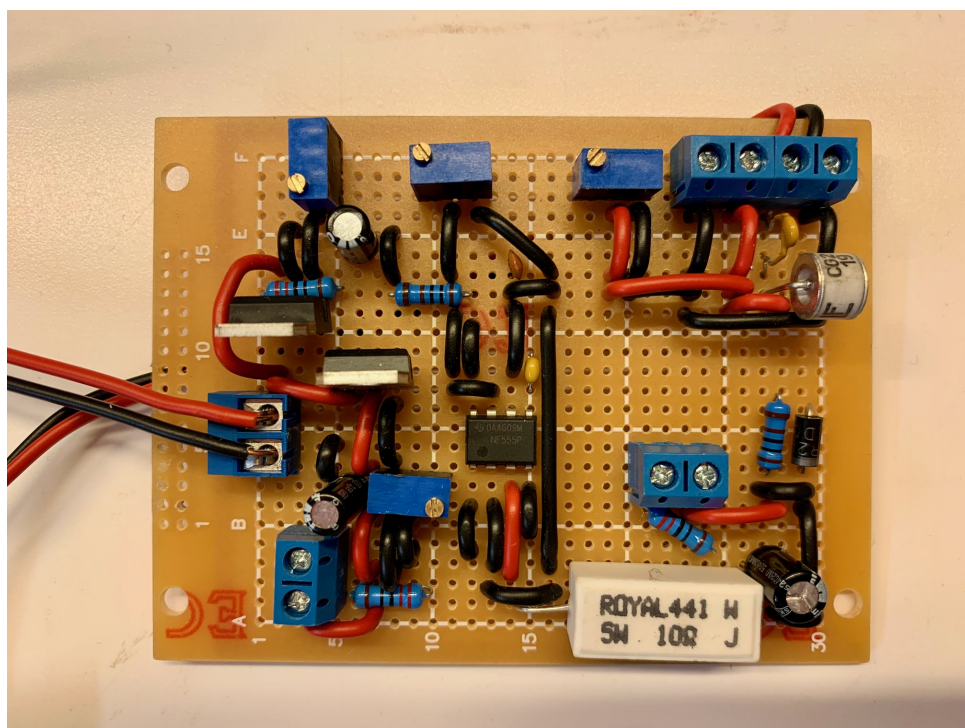
Dosud sestavený obvod byl uveden do provozu. Spínané napětí bylo potenciometrem P4 prozatím nastaveno na nízkou hodnotu a regulační tranzistor byl trimrem P1 uzavřen. Trimrem P3 byla upravena spínací frekvence přibližně na 15 kHz. Z důvodu chybně zkalibrovaného osciloskopu byla použita metoda akustická (obvod slyšitelně píská).

Spínačem SW1 byl připojen transformátor do obvodu. Postupně bylo potenciometrem P4 a trimrem P1 zvyšováno spínané napětí a proud. Na jednoduchém výstupním děliči však bylo naměřeno napětí nejvýše 10 V (odpovídá přibližně 10 kV výstupního napětí zdroje) při nejvyšším spínaném napětí a zcela otevřeném tranzistoru T1. Rovněž byly provedeny zkoušky hoření elektrického oblouku na výstupu zdroje. Tento oblouk byl velmi krátký (kratší než 1 cm).

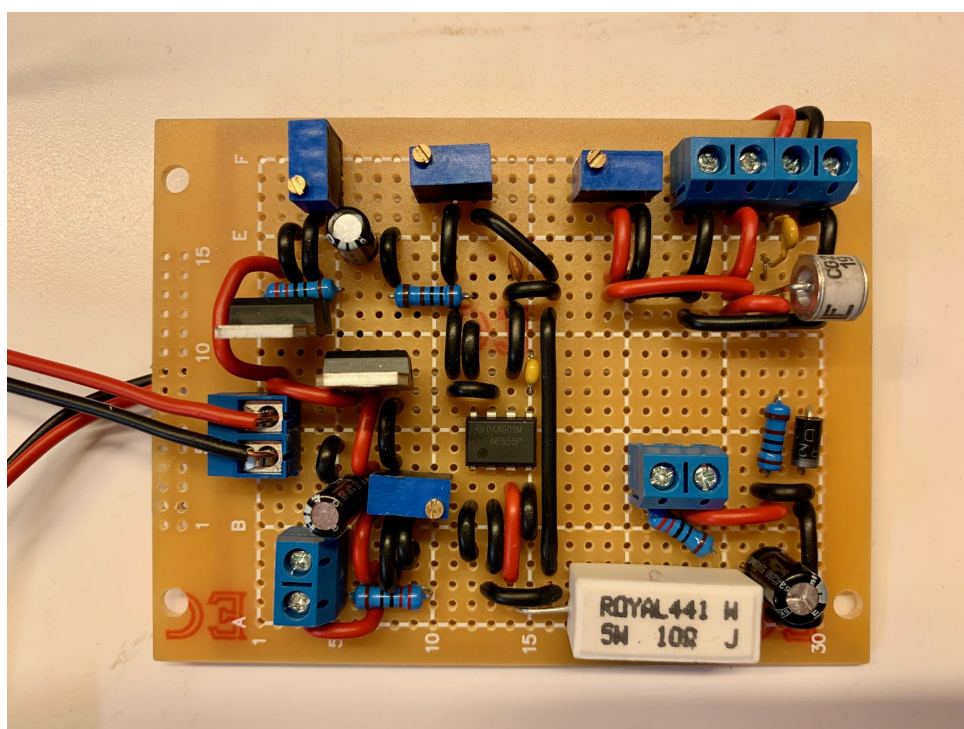
Byla provedena zkouška vlivu spínací frekvence (regulace trimrem P3) na velikost výstupního napětí bez uspokojivého výsledku. Neprojevilo se prakticky žádné vlivu rezonance. Se zvyšující se frekvencí navíc klesala amplituda pulzů na výstupu časovače NE555 (IC2), což vedlo k nedostatečnému otevírání spínacího tranzistoru (T2). Zdroj bude tedy nutno upravit.



Obrázek 7.4: Plošný spoj s napájecími obvody.



Obrázek 7.5: Deska s oscilátorem.



Obrázek 7.6: Spínací tranzistor s chladičem a ochranným RDC členem.

Kapitola 8

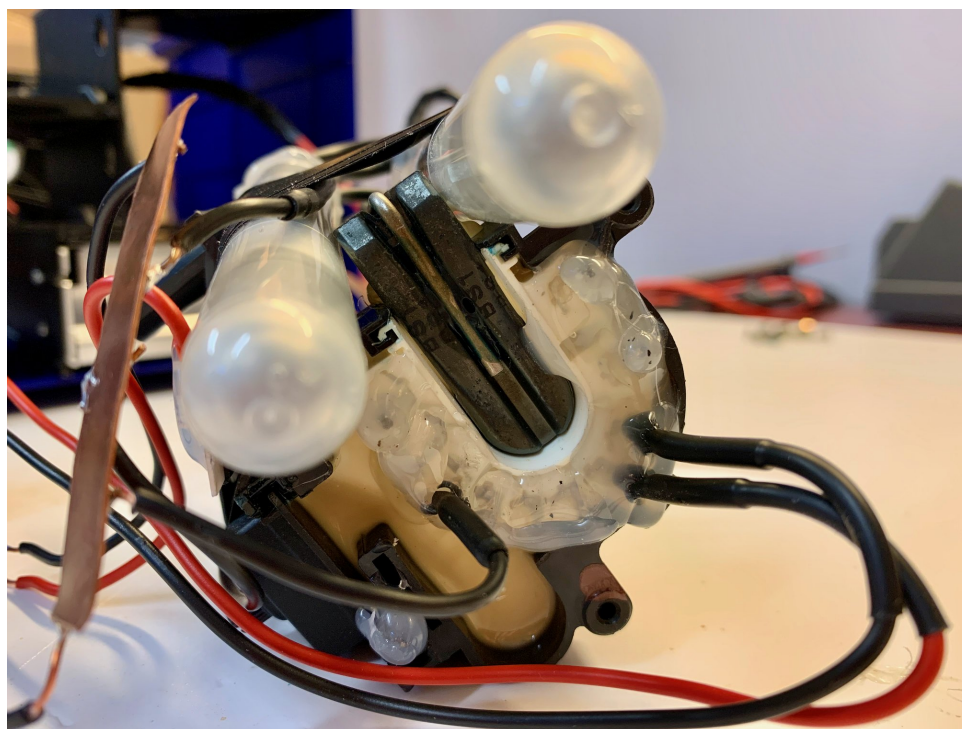
Úpravy, dokončení a kalibrace

8.1 Volba primárního vinutí

Protože výstupní napětí zdroje nebylo dostatečně velké a zvyšování spínaného napětí nad 20 V nebylo možné (dosažitelných 24 V podle zadání by nesplnilo požadovaný efekt dostat výstupní napětí na dvojnásobnou hodnotu), bylo třeba hledat řešení v samotném transformátoru. Výstupní napětí transformátoru je usměrněné integrovanými diodami, nelze jej tedy násobit. V úvahu připadla jediná možnost, a to zvolit jiné primární vinutí.

IHVT transformátor má podle [PanX1] několik primárních vinutí. Ta byla s pomocí ohmmetru identifikována. Po připojení jiného primárního vinutí transformátoru (které má méně závitů) bylo dosaženo požadovaného výsledku. Na výstupu zdroje bylo možno udržet i poměrně dlouhý elektrický oblouk (přibližně 3 cm) a na provizorním děliči bylo naměřeno i 40 V (odpovídá 40 kV na výstupu zdroje).

V důsledku toho však mezi některými vývody transformátoru začaly přeskakovat jiskry. Proto byly vývody izolovány tavným lepidlem, jak ukazuje obrázek 8.1. Rovněž byl trimrem P5 upraven rozsah nastavitelných spínaných napětí tak, aby se na výstupu zdroje neobjevilo větší napětí než přibližně 22 kV.



Obrázek 8.1: Lepidlem zalité vývody vinutí IHVT transformátoru.

8.2 Regulace výstupního napětí až do nuly

Měřením bylo zjištěno, že regulátor LM338T (IC3) neumožňuje dosáhnout výstupních napětí nižších než 1,24 V. To mělo za následek, že minimální výstupní napětí zdroje se pohybovalo okolo 3 kV. Aby mohlo být dosaženo nulového napětí, bylo třeba přidat další regulační prvek. Jako řešení bylo zvoleno umístění odporového děliče před hradlo spínacího tranzistoru T2.

Dělič byl vytvořen z rezistoru R11 (470 k Ω) a potenciometru P7 (100 k Ω). Výstupní napětí tak lze řídit hrubě regulací spínacích impulzů (potenciometr P7) a jemně velikostí spínaného napětí (potenciometr P4).

Regulace potenciometrem P7 však nebyla pohodlná. Nulového výstupního napětí bylo dosaženo dříve než při poloviční nastavené poloze potenciometru P7. Pro vylepšení uživatelského komfortu a využití širší části otáčivého rozsahu potenciometru byl paralelně k němu připojen rezistor R12 (33 k Ω), který omezuje jeho velikost. Rezistor R12 neesteticky, ale funkčně připájený k potenciometru P7 je zachycen na obrázku 8.2.



Obrázek 8.2: Omezení rozsahu potenciometru P7 rezistorem R12 (vpravo dole).

8.3 Měření výstupního napětí

Pro přesné měření a zobrazení výstupního napětí byl sestaven obvod na sekundární straně transformátoru, jak je zdokumentováno ve schématu č. 2. Jako voltmetr bylo použito panelové měřidlo napájené galvanicky odděleným stejnosměrným napětím 9-12 V, k čemuž byl použit další regulátor LM317T v podobě IC4 a jemu příslušných komponent.

Měřené napětí má očekávanou nejvyšší velikost 20 V. Rozsah měřidla je 200 V. Přesto byla pro ochranu vstupu měřidla před případnými napěťovými nebo proudovými špičkami použita bleskojistka F3 a vratná pojistka F2, protože jedno měřidlo bylo v průběhu pokusů zničeno. Tato ochrana problém odstranila. Vnitřní odpor měřidla byl ohmmetrem změřen na 5 M Ω . Pro přesné nastavení poměrů na měřícím děliči byl zapojen trimr P8 (500 k Ω).

8.4 Chlazení

Protože některé součástky (zejména regulátor spínaného napětí IC3) se při provozu zahřívají, zdroj byl vybaven ventilátorem pro lepší odvod tepla z chladičů. Ventilátor (M) je připojen k napájecímu stejnosměrnému zdroji ještě před pojistkou, aby v případě výskytu problému a přetavení pojistky nedošlo k přerušení chlazení. Výhoda zapojení tkví také v tom, že jsou skrze ventilátor vybity kondenzátory spínaného zdroje po odpojení zařízení od sítě.

8.5 Kalibrace

Při uvedení zdroje do provozu byla nejprve provedena kalibrace měřicího děliče pomocí ohmmetru a trimru P8 tak, aby měřené napětí na paralelní kombinaci potenciometru P8, pojistky F3 a měřidla V mělo hodnotu 0,001 násobku výstupního napětí zdroje. Celková velikost odporu měřicího děliče je přibližně 288 M Ω , velikost odporu měřicí části byla zkalibrována na 288 k Ω .

Následně byla trimrem P3 upravena frekvence spínaného napětí přibližně na 15 kHz (měřeno mikrofonom a FFT analýzou vzorkovaného signálu v počítači z důvodu špatně zkalibrovaného osciloskopu). Významný pracovní bod vykazující známky rezonance však nebyl nalezen, jak bylo zmíněno dříve.

Posledním krokem byla kalibrace potenciometru P4 ovlivňujícího velikost spínaného napětí regulátorem IC3. Potenciometry P4 a P7 (regulace spínaného napětí a velikosti spínacích impulsů) byly nastaveny na nejvyšší možnou hodnotu odporu. Velikost odporu trimrů P5 a P1 (regulace spínaného napětí a omezení proudu) byly nastaveny na nejnižší možnou hodnotu. Zdroj byl následně uveden do provozu. Proud byl omezen uzavřeným tranzistorem T1 a výstupní napětí bylo nulové. S pomocí trimru P1 byl postupně otevírán tranzistor T1 dokud se zvyšovalo výstupní napětí, zdroje, které se ustálilo na hodnotě přibližně 3 kV z důvodu zmíněného v části 8.2.

Následně byly postupně zvětšovány odpory trimrů P5 a P1, dokud nebylo na výstupu dosaženo výstupního napětí zdroje o velikosti přibližně 22 kV. Napětí na výstupu v průběhu provozu kolísá, protože zdroj není stabilizovaný žádnou zpětnou vazbou do budícího obvodu, a tak byla ponechána rezerva pro případ, že by napětí na výstupu z nějakého důvodu pokleslo - například proto, že by byl zdroj provozován mírně zatížen.

Zmíněný postup dostal zdroj do pracovního stavu takového, ve kterém je dosaženo požadovaného výstupního napětí při co nejmenším výkonu. To je vhodné především z hlediska bezpečnosti.

8.6 Přístrojová krabice

Na trhu jsou dostupné univerzální přístrojové krabice podobně jako univerzální desky plošných spojů. Zatímco výroba desky plošných spojů na zakázku by byla v dané aplikaci komplikovanější než použité řešení s univerzálními deskami plošných spojů, přístrojová krabice byla varobena na míru.

Komponenty zdroje napětí (napájecí spínaný zdroj, desky plošných spojů s chladiči, transformátor a ventilátor) byly změřeny a na základě jejich rozměrů byly navrženy díly přístrojové krabice. Krabice byla navržena tak, aby byl celý přístroj kompaktní, ale zároveň aby byl dostatek prostoru pro montáž komponent do krabice.

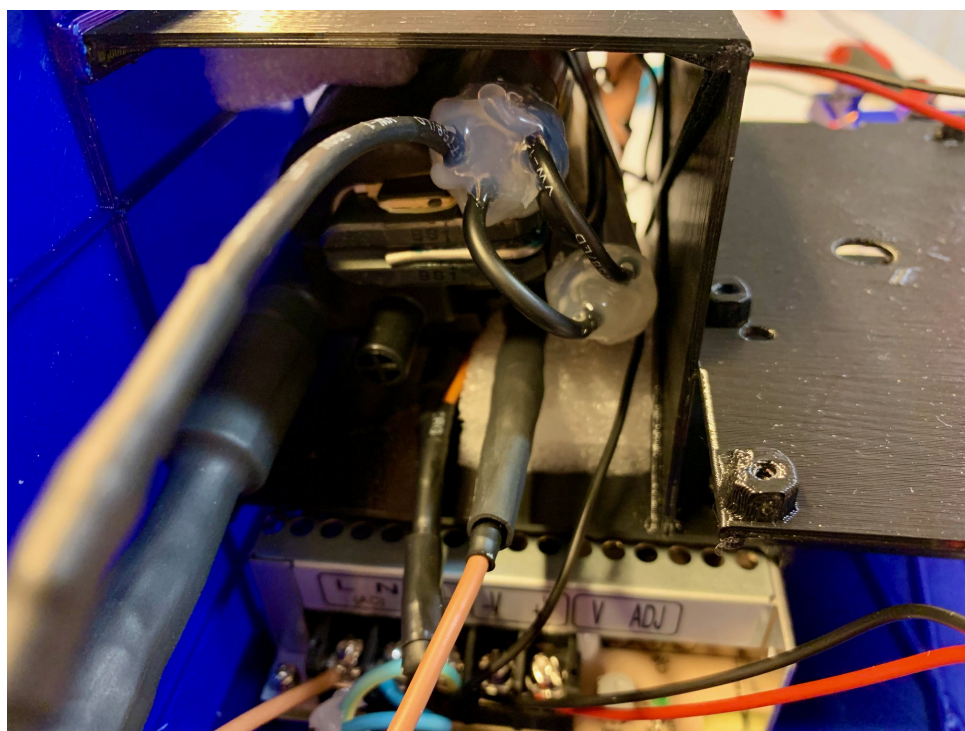
Pro spínaný zdroj, transformátor a desky plošných spojů byly navrženy vlastní přepážky. Boční stěny krabice jsou děrované a na jedné z nich je umístěn ventilátor, což zajišťuje proudění vzduchu. Čelní strana obsahuje otvory pro osazení panelovým měřidlem, potenciometry a výstupními banánkovými konektory. Víko krabice obsahuje drážky pro upevnění chladičů.

Návrh dílů krabice byl zhotoven v programu AutoCAD. Byly vytvořeny 3D modely jednotlivých dílů přístrojové krabice, které byly následně vytištěny na 3D tiskárně. K tisku byl použit modrý a černý materiál PETG. Díly krabice stejně jako komponenty jsou uchyceny pomocí samořezných vrtů v předpřipravených otvorech. Transformátor je pak vzhledem ke svému specifickému tvaru uchycen v přepážce pouze pomocí výstupy měkkou pěnovou výstelkou. Montáž komponent a celé krabice zachycují obrázky 8.3 až 8.11.

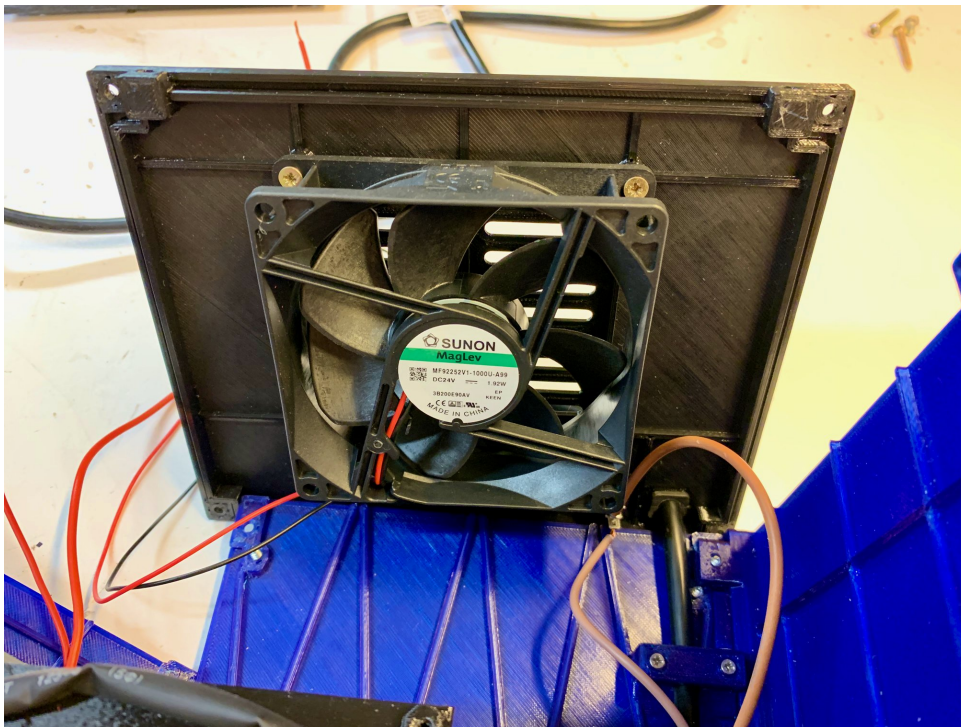
Krabice je navíc z vnější strany osazena komponenty, jakými jsou panelové měřidlo, potenciometry P4 a P7, spínač SW1 a svorky zdroje (banánkové konektory). Poloha konektorů byla navržena tak, aby při maximálním výstupním napětí nedošlo k samovolnému vzniku elektrického oblouku mezi svorkami a aby byl minimalizován pokles napětí vlivem koronového výboje. Optimální vzdálenost byla určena pokusy se zdrojem v průběhu jeho konstrukce. Napájení spínaného zdroje je navíc opatřeno zvláštním vypínačem na fázovém vodiči.



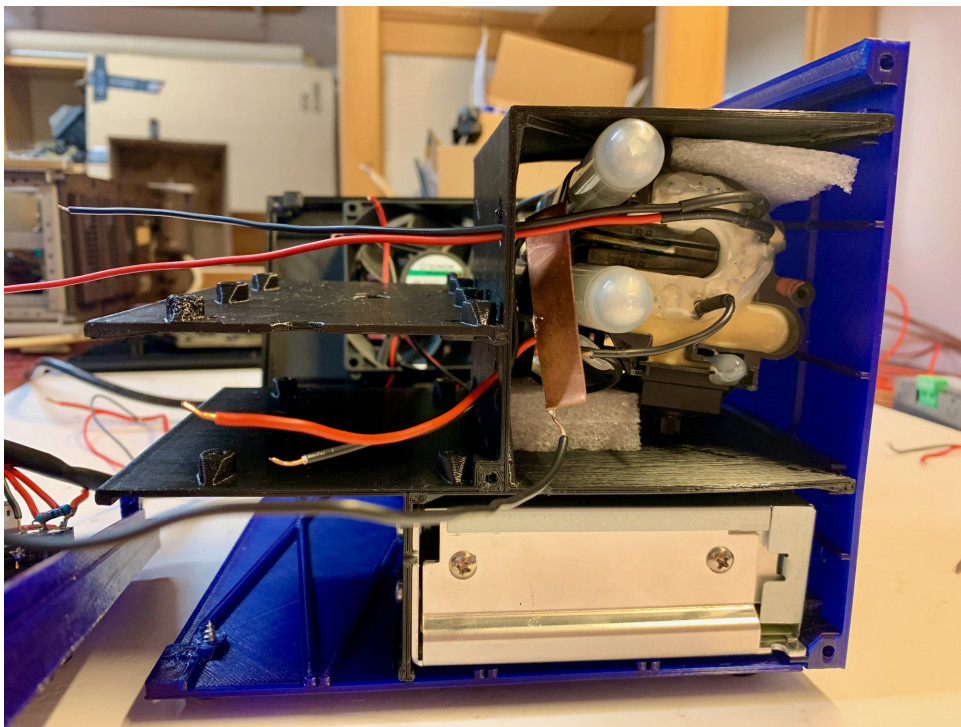
Obrázek 8.3: Spínaný zdroj uchycený ve své přepážce přístrojové krabice.



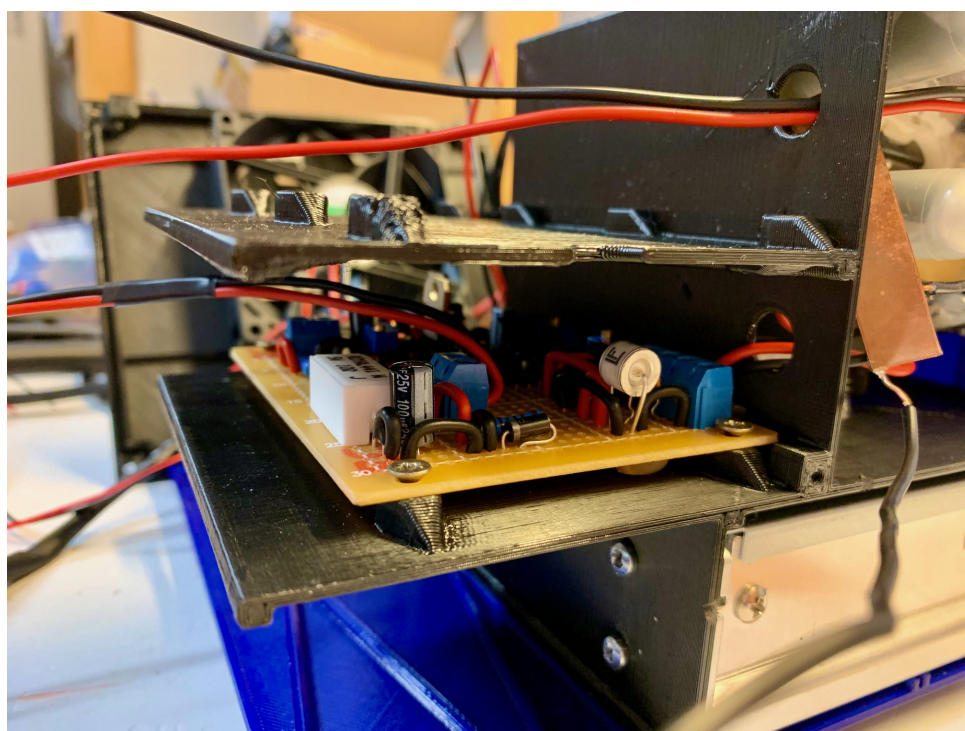
Obrázek 8.4: Transformátor uchycený ve své přepážce přístrojové krabice.



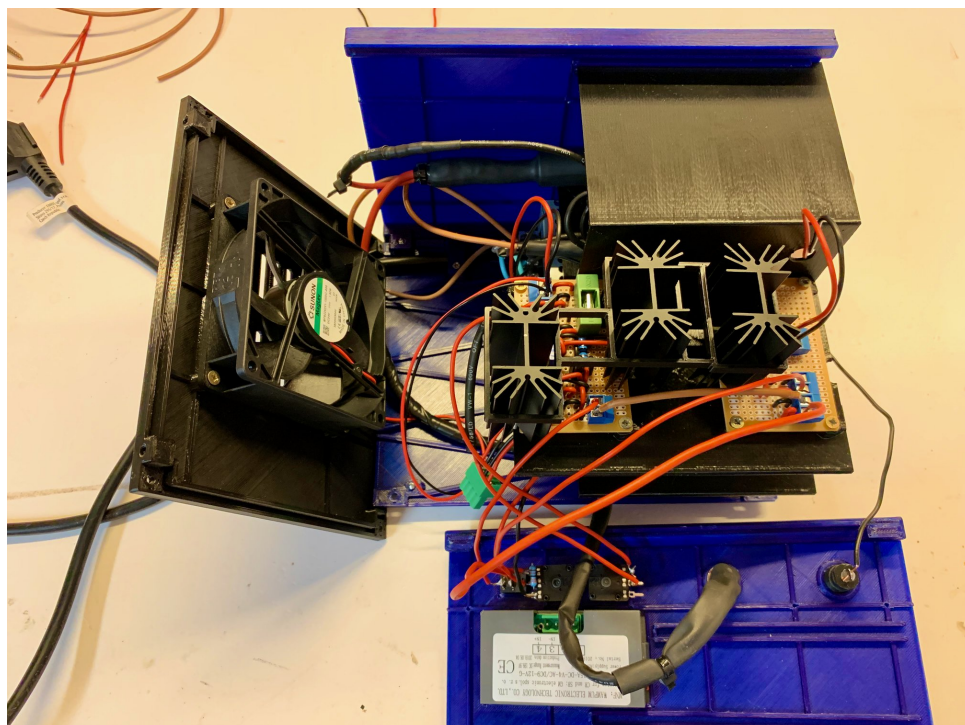
Obrázek 8.5: Ventilátor uchycený na boční straně přístrojové krabice.



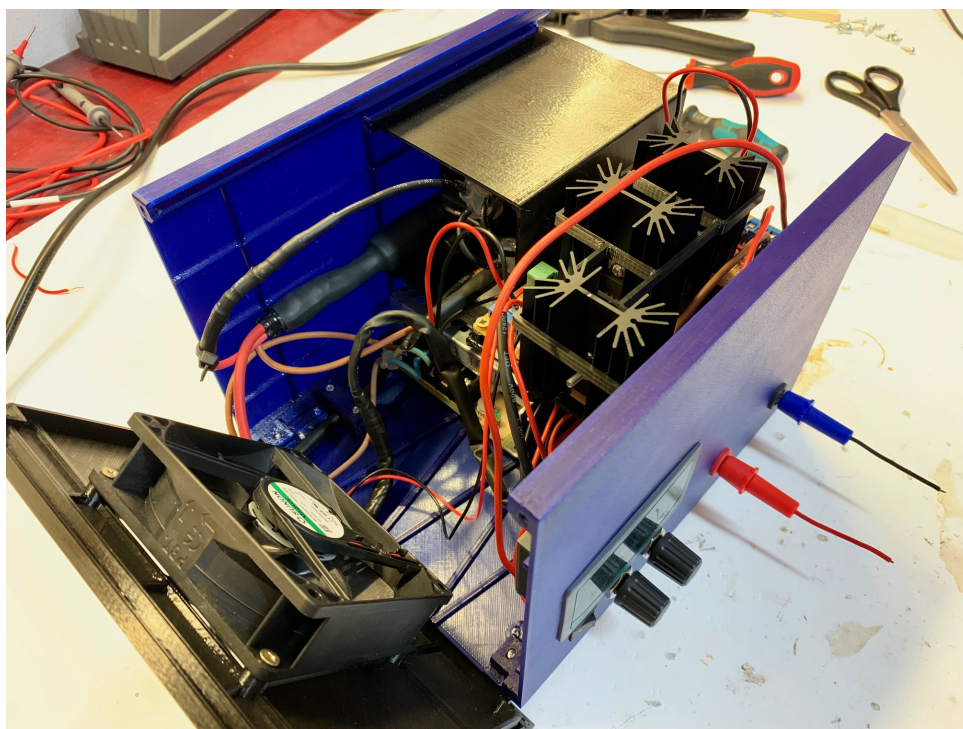
Obrázek 8.6: Boční pohled na uchycený spínaný zdroj a transformátor.



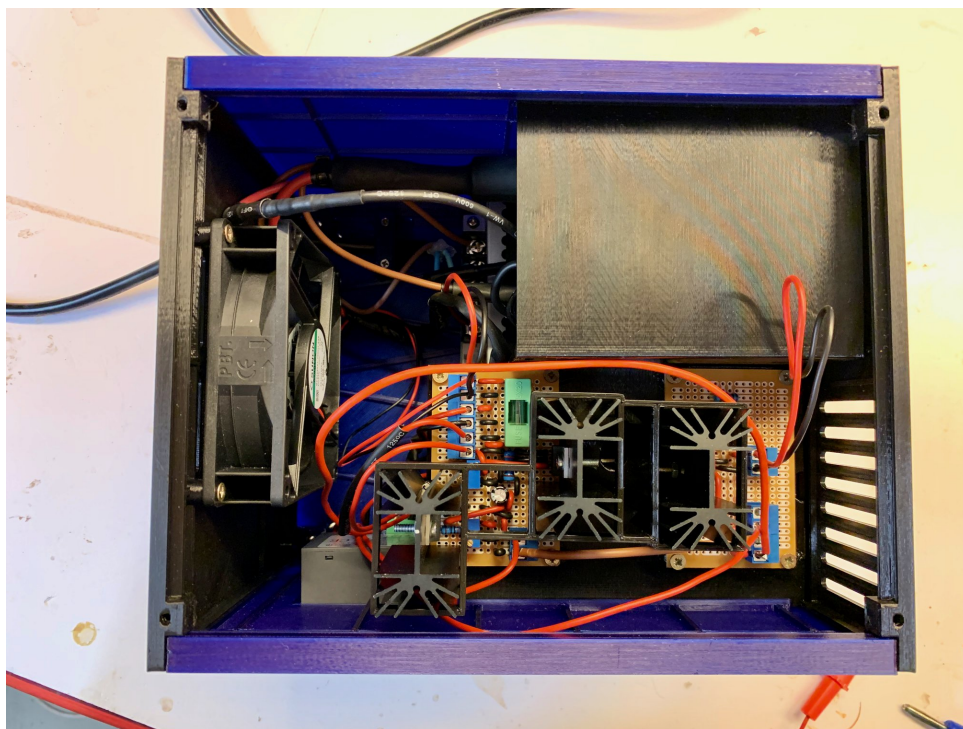
Obrázek 8.7: Plošný spoj s oscilátorem, napájením měřidla a měřícím obvodem.



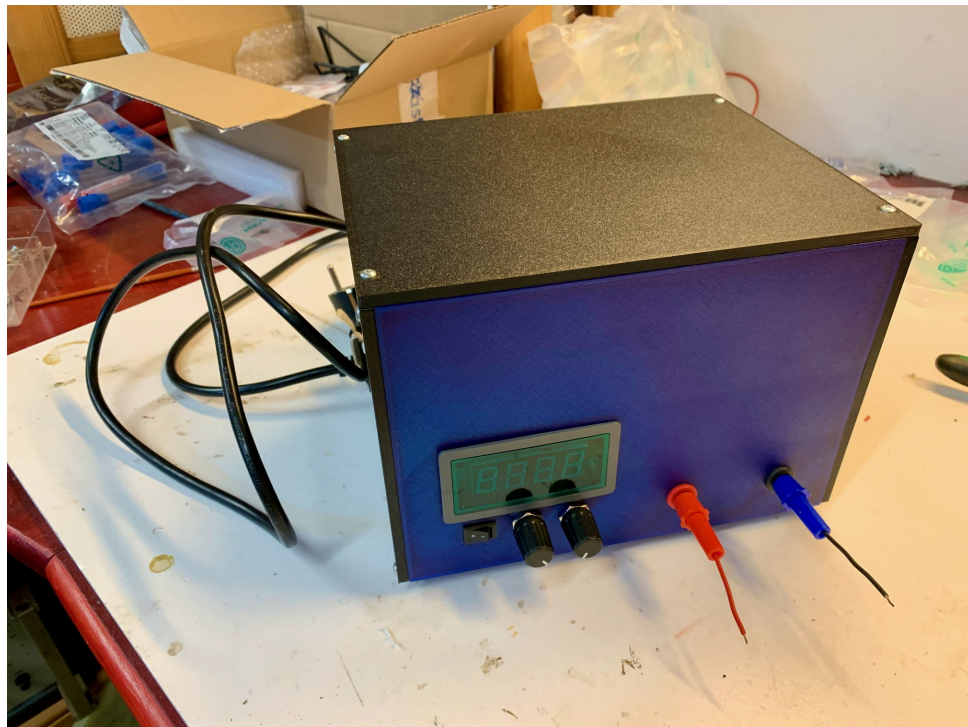
Obrázek 8.8: Upevněné plošné spoje zajišťující napájení a spínání napětí na transformátoru. Čelní strana krabice je rovněž již osazena.



Obrázek 8.9: Čelní strana krabice je upevněna do své polohy.



Obrázek 8.10: Vrchní pohled na krabici.



Obrázek 8.11: Kompletně sestavený zdroj vysokého napětí připravený k obsluze uživatelem.

Na obrázku 8.11 je vidět také vyvedená napájecí síťová šňůra a vodiče s obnaženými konci zapojenými na výstupní svorky zdroje. Ty slouží k demonstraci elektrického oblouku pro různě vysoká napětí.

Kapitola 9

Měření a zhodnocení funkčnosti zdroje

Protože měření probíhalo v domácích podmínkách, nelze jeho přesnost považovat za vysokou, avšak jistou informační představu o funkci zdroje poskytuje. Pro měření v průběhu celé práce byl použit digitální multimetr *Keysight U1282A* a analogový osciloskop *Tesla BM 566A*. Multimetr spadá do kategorie vyšší třídy, avšak osciloskop byl vyřazený ve společnosti ABB přibližně před 15-20 lety a od té doby je neudržovaný a nekalibrovaný.

9.1 Voltampérová charakteristika zdroje

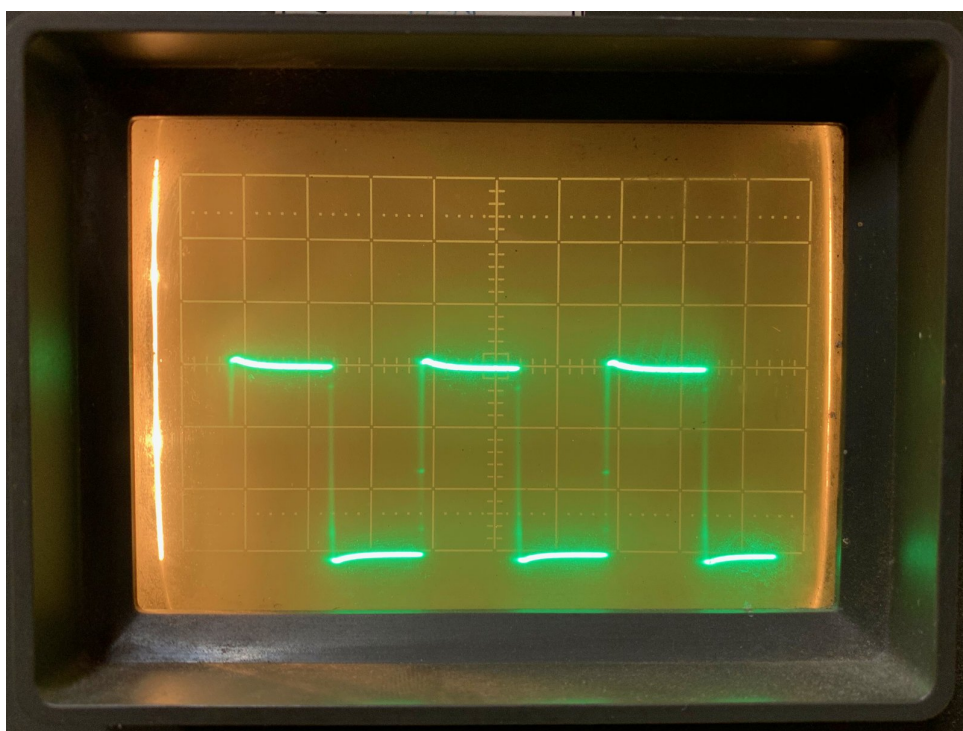
Protože při realizaci práce nebyl k dispozici žádný přístroj pro přesné měření vysokého napětí, je třeba spoléhat se na správnou kalibraci konstruovaného zdroje vysokého napětí a na použitý panelový voltmetr. Napětí naprázdno zdroje se přibližuje až k

$$U_{OC} = 22 \text{ kV},$$

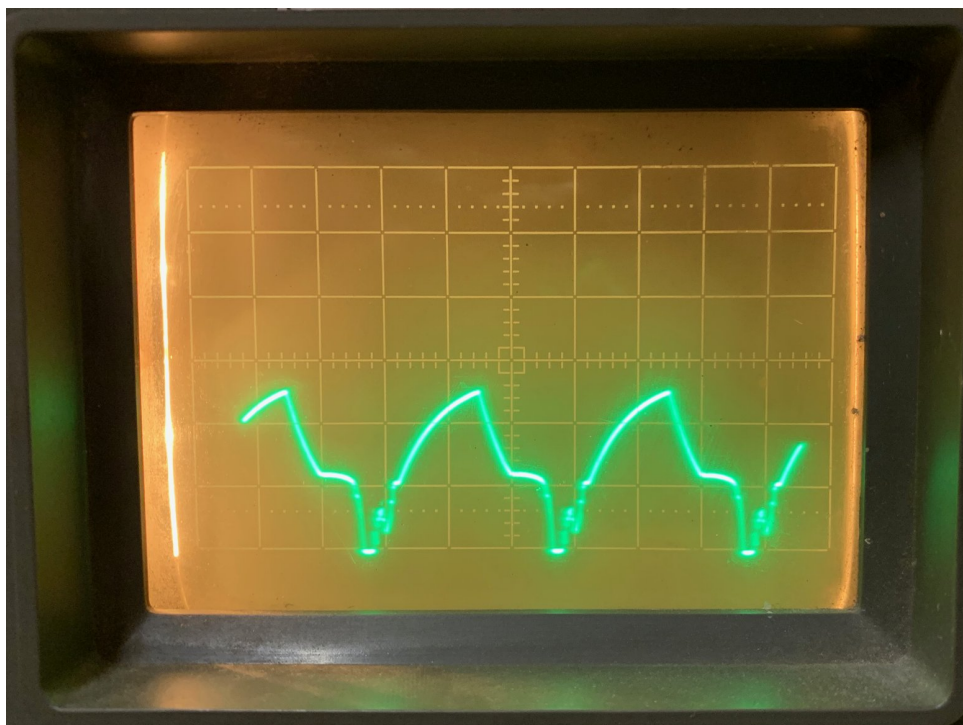
a to za podmíněk, že je zdroj umístěn v suchém prostředí a jeho svorky jsou dostatečně izolovány, aby nedocházelo ke koronovému výboji (byť neviditelnému).

Proud nakrátko byl změřen multimetrem a má při nejvyšší nastavené hodnotě napětí velikost

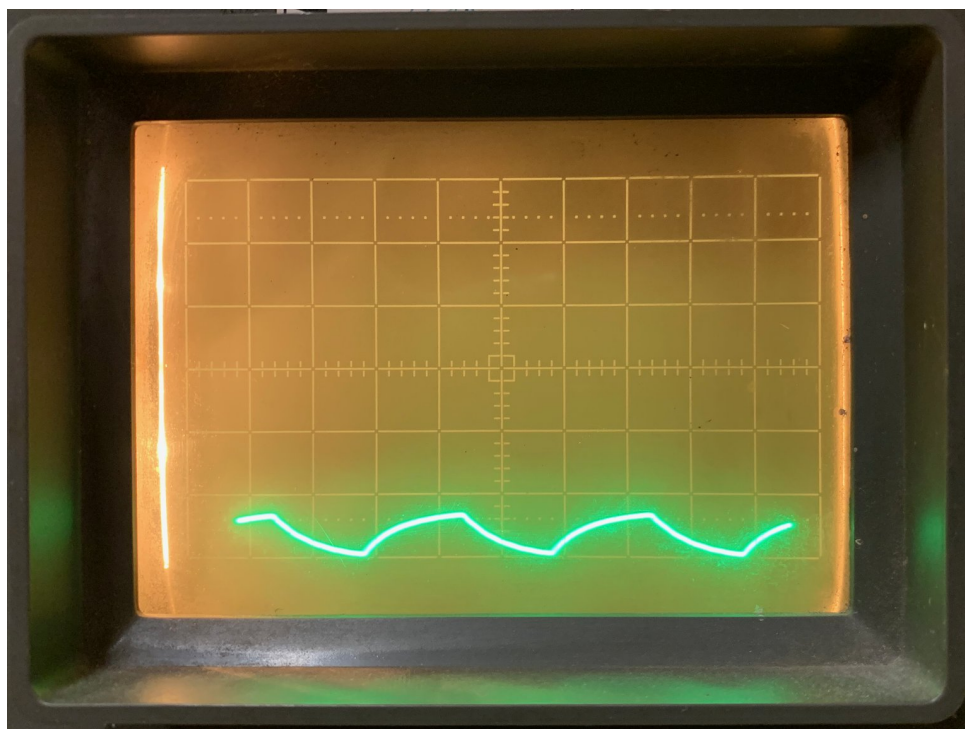
$$I_{SC} = 9,4 \text{ mA},$$



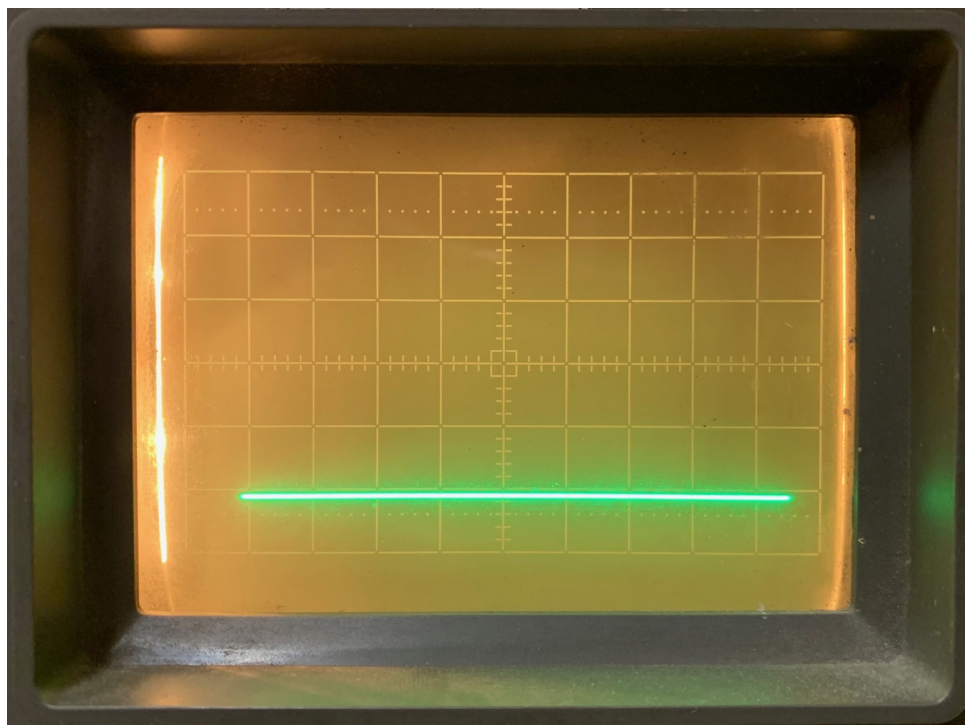
Obrázek 9.1: Průběh spínacích impulzů při nejvyšší hodnotě odporu potenciometru P7. 1 dílek odpovídá 1 V.



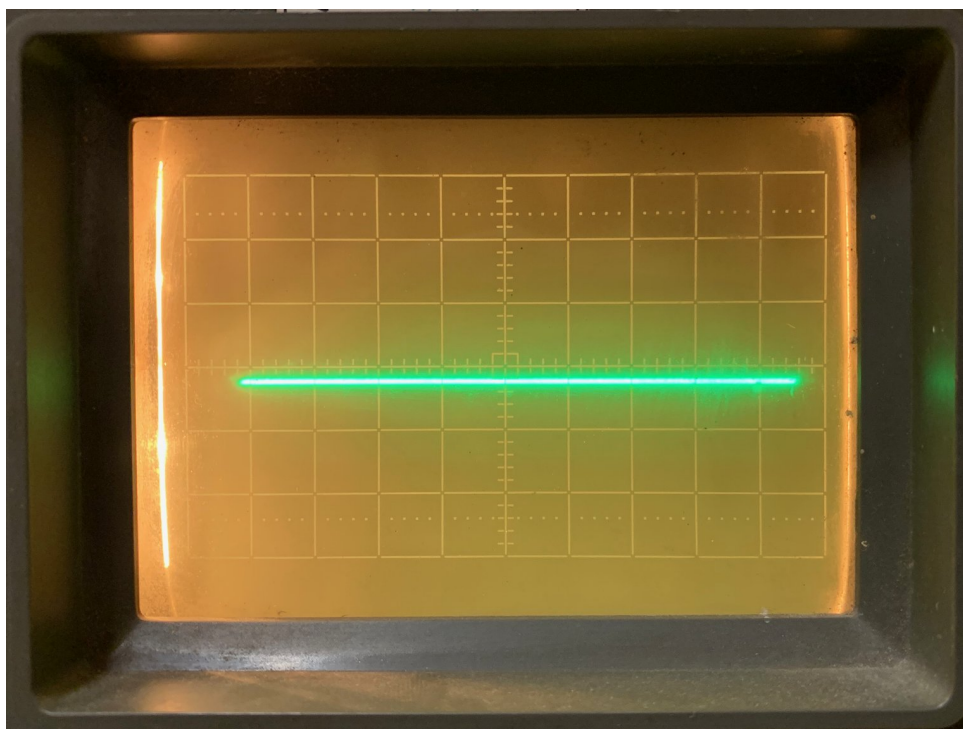
Obrázek 9.2: Průběh spínacích impulzů při střední hodnotě odporu potenciometru P7. 1 dílek odpovídá 1 V.



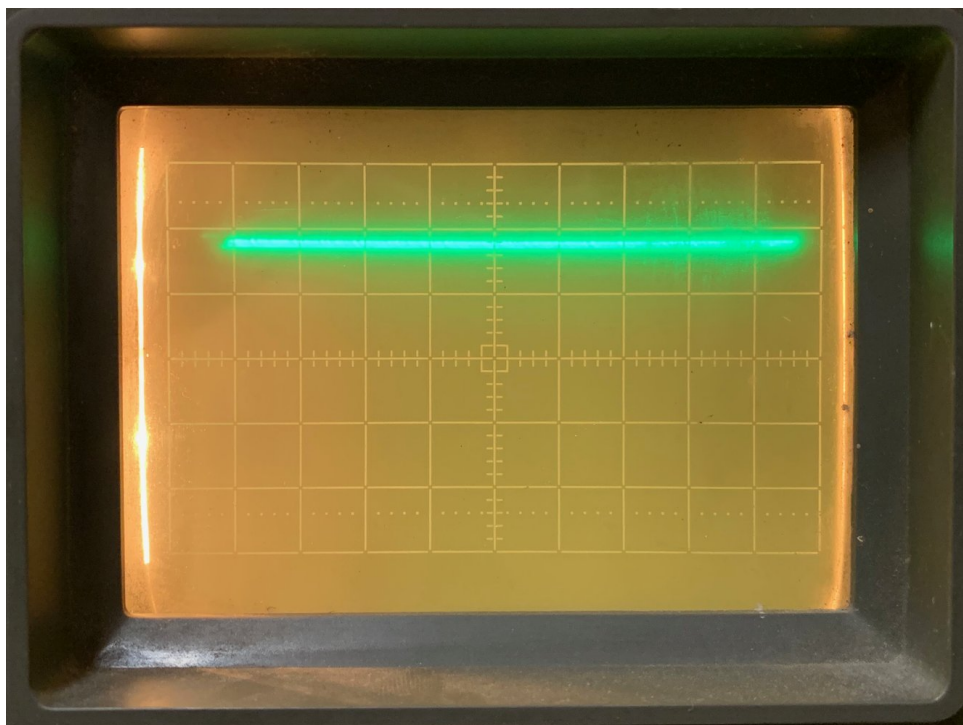
Obrázek 9.3: Průběh spínacích impulsů při nízké hodnotě odporu potenciometru P7. 1 dílek odpovídá 1 V.



Obrázek 9.4: Průběh nízkého nastaveného výstupního napětí. 1 dílek odpovídá 1 kV.



Obrázek 9.5: Průběh středního nastaveného výstupního napětí. 1 dílek odpovídá 1 kV.



Obrázek 9.6: Průběh nejvyššího nastaveného výstupního napětí. 1 dílek odpovídá 1 kV.

9.4 Zhodnocení použitelnosti zdroje

Zvolená topologie zdroje vysokého napětí byla poměrně snadná na konstrukci. To s sebou přineslo možnost zkonstruovat zdroj vysokého napětí v podmínkách domácí dílny, avšak přineslo s sebou jisté nevýhody.

Parametry zdroje vyhovují zadání. Jak ukázala předchozí měření, výstupní napětí zdroje lze regulovat v rozsahu 0-20 kV. Napětí na svorkách je díky vyrobenému kondenzátoru prakticky čistě vyhlazené. Velikost výstupního napětí je uživateli zobrazena na displeji v číselných hodnotách odpovídajícím jednotkám kV. Výstupní proud se pohybuje v bezpečných mezích. Zdroj je napájen ze sítě prostřednictvím stabilizovaného spínaného stejnosměrného zdroje napětí 24 V.

Používání zdroje napětí by mělo být bezpečné. Konstrukce zdroje je pevná, komponenty jsou dobře připevněny. Dovnitř krabice nelze proniknout žádnou částí ruky. Svorek zdroje se nelze dotknout. Součástky zdroje jsou opatřeny chladiči a celý prostor vnitřku přístroje je větrán. Zdroj je opatřen dvěma vypínači zajišťujícími různé možnosti provozu zdroje.

Nevýhodou zdroje napětí je, že neobsahuje zpětnou vazbu a stabilizaci výstupního napětí. V takovém případě by musel být zkonstruován složitější elektronický obvod náročnější na použité komponenty a provedenou práci. Jistá forma stabilizace s pomalou odezvou tak může být prováděna pouze ručně při sledování údaje o výstupním napětí na panelovém měřidlu.

Nedostatkem je také fakt, že přesnost měření výstupního napětí nemohla být v domácích podmínkách ověřena. Obvod je však vybaven prostředky pro kalibraci.

Celkově lze zkonstruovaný zdroj napětí hodnotit jako velmi dobře použitelný například pro demonstraci koronového výboje a elektrického oblouku. Lze také pomocí něj provádět orientační pokusy zkoumající vliv vysokého napětí na předměty a materiály. V případě, že by byl zdroj zkalibrován pomocí přesnějších přístrojů a byla by ověřena stabilita zdroje při jeho používání v průběhu času, mohl by být pravděpodobně využit i například k měření dielektrické pevnosti materiálů.



Přílohy

Příloha A

Literatura

- [Ana20] Analog Devices, Inc. *LTspice*. Analog Devices, Inc. [online], 2020. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- [AspX1] AspenCore, Inc. *Transformer Basics: Transformer EMF Equation*. ElectronicsTutorials [online]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/transformer/transformer-basics.html>
- [Bro04] M. Brož. *Amatérské RADIO 7/2004: VN Zdroj 0 až 30 kV*. AMARO s.r.o., Praha, 2004. Dostupné z: <http://volnaenergie.xf.cz/navody/vn.pdf>
- [Bur11] V. Burlak. *Elektro 6/2011: Jak se dělá transformátor*. FCC Public [online], 2011. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/43693.pdf>
- [DanX1] Danyk.cz. *Impulzní zdroje a měniče I.*. Danyk.cz [online]. Dostupné z: <http://danyk.cz/zdroje.html>
- [DanX2] Danyk.cz. *Zdroj vysokého napětí 40 000 V ss*. Danyk.cz [online]. Dostupné z: <http://danyk.cz/zdrojvn.html>
- [DanX3] Danyk.cz. *Impulzní zdroje a měniče III. - Ochrana tranzistorů a MOSFETů*. Danyk.cz [online]. Dostupné z: <http://danyk.cz/mosfety.html>
- [DanX4] Danyk.cz. *Zapojení integrovaného vn trafa (IHVT) z monitoru nebo moderní TV*. Danyk.cz [online]. Dostupné z: <http://danyk.cz/ihvt.html>

- [Ele01] ElektriKa.info s.r.o. *Stará televize - co s ní? (1.)*. Profi ElektriKa.cz [online], 2001. Dostupné z: <https://elektriKa.cz/data/clanky/pcoeovn011219>
- [Elf20] Elfetex s.r.o. *ELEKTROKOV Trafo 230V/24V JBC E4050-1126 320VA*. Elfetex [online], 2020. Dostupné z: <https://www.elfetex.cz/10-033-395-elektrov-rafo-230v24v-jbc-e4050-1126>
- [HaM04] V. Haškovec, O. Müller. *Galerie géniů: 222 osobností, které změnily svět*. Albatros, Praha, 2004. ISBN 80-00-01517-X.
- [Kle15] M. Klejma. *Zdroj vysokého napětí pro měření elektrické pevnosti izolantů*. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno, 2015. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=105346 Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Martiš.
- [Kos13] T. Kostka. *Základní elektrotechnické předpisy*. Střední škola, Havířov-Šumbark, Havířov, 2012-2013. Dostupné z: http://mtom.8u.cz/files/ke_stazeni/el_normy_uvod.pdf
- [Kos14] V. Kostka. *Základní zapojení regulátoru napětí LM317T*. Vencovo bastlení a pokusy [online], 2014. Dostupné z: http://vencovo-bastleni.wz.cz/schemata/zdroje_nabijece_regulace/lm317_za.php
- [Kul12] P. Kulháněk. *Blýskání Petra Kulhánka: 6. První výzkumy blesků*. Aldebaran [online], 2011-2012. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/zvuky/blyskani/docs/06.html>
- [Lys08] V. Lysenko. *VN zdroje: zdroje vysokého napětí pro experimenty, pokusy a měřicí přístroje, ochranné pomůcky*. BEN - technická literatura, Praha, 2008. ISBN 978-80-7300-235-0.
- [Mas05] S. Maslan. *Vysokonapěťový transformátor z televize*. elektronika.kvalitne.cz [online], 2005. Dostupné z: <http://www.elektronika.kvalitne.cz/VN/vntvtrafo/vntvtrafo.html>
- [Mud16] A. Mudruňková. *Magnetické materiály*. Elektrotechnické materiály I. [online], 2016. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>
- [Ok15] OK9TAZ. *Zdroj VN 20kV*. Elektronika-bastlení [online], 2015. Dostupné z: <https://elektronkyavn.webnode.cz/news/zdroj-vn-20kv/>
- [PanX1] Panasonic. *Service Manual, Colour Television TX-21AP1P, Z8T Chasis*.
- [ReV21] J. Rejchl, M. Všeticka. *Vlastní indukce*. Encyklopedie fyziky [online], 2021. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/307-vlastni-indukce>

- [StřX1] L. Stříteský. *Různá obvyklá i neobvyklá zapojení s časovačem 555*. AmaroK [online]. Dostupné z: <http://amarokcz.wz.cz/555.htm>
- [Stu19] I. Stulíková. *Třesky blesky*. Matfyz [online], 2019. Dostupné z: <https://www.matfyz.cz/clanky/tresky-blesky>
- [Šle13] J. Šlégr. *Veletrh nápadů učitelů fyziky 18: Jednoduché zdroje vysokého napětí pro školní praxi*. Gaudeamus, UHK, Hradec Králové, 2013. ISBN 978-80-7435-372-7. Dostupné z: <https://vnuf.cz/sbornik/prispevky/18-28-Slegr.html>
- [Tex13] Texas Instruments. *LM138/LM338 5-Amp Adjustable Regulators*. Texas Instruments Incorporated, 1998-2013.
- [Vis02] Vishays. *3-Terminal Adjustable Output Positive Voltage Regulators*. Vishay - formerly General Semiconductor, 2002.
- [Que17] A. C. M. de Queiroz. *The Holtz Electrostatic Influence Machine*. Universidade Federal do Rio de Janeiro [online], 2017. Dostupné z: <https://www.coe.ufrj.br/~acmq/holtz.html>
- [Whi09] WhiteBear. *Zdroj vysokého napětí z televizního transformátoru 2*. WhiteBear [online], 2009. Dostupné z: <http://www.white-bear.cz/zdroj-vysokeho-napeti-jedna.html>

Pozn.: Všechny on-line dostupné zdroje byly citovány před dokončením práce, tedy dříve než v květnu 2021. Autor práce nenese odpovědnost za případné změny v obsahu či dostupnosti zdrojů, ke kterým od té doby mohlo dojít.



Příloha B

Schémata

Součástí příloh jsou schémata č. 1 a č. 2 odpovídající teoretickému návrhu a dokumentaci skutečně zkonstruovaného zdroje vysokého napětí. Parametry součástek zanesených ve schématu č. 2 jsou uvedeny v kapitole 6.