



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Funkční model impulsního testeru vinutí cívek

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Mikuláš Tschunko**

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Functional model of impulse coil winding tester

Master thesis

Study programme: N2612 – Electrical Engineering and Informatics

Study branch: 3906T001 – Mechatronics

Author: **Bc. Mikuláš Tschunko**

Supervisor: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Mikuláš Tschunko**
Osobní číslo: **M16000149**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Mechatronika**
Název tématu: **Funkční model impulsního testeru vinutí cívek**
Zadávací katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte princip impulsního testování vinutí cívek, při kterém se do vinutí vybije kondenzátor a sledují se kmity tohoto LC obvodu.
2. Navrhněte hardware impulsního testeru. Předpokládáme řízený zdroj vysokého napětí 50–1000 V, měřicí kondenzátor, tyristor a snímací dělič napětí. Vlastní měření bude provedeno osciloskopem.
3. Podle návrhu postavte a oživte prototyp. Funkčnost ověřte na vzorcích cívek.

Rozsah grafických prací: **dle potřeby dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **40–50 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] Mayer, D. Teorie elektromagnetického pole (2 díly). ZČU, Plzeň, 2004.
- [2] Marchevsky M., Ravaioli E., Ambrosio G., Impulse testing of coils and magnets: present experience and future plans. MQXF Workshop on Structure, Alignment, and Electrical QA, CERN, 2016

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Novák, Ph.D.**

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Kubín, Ph.D.**

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2018**

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan



Kolář
doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 10. října 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 1.5.2018

Podpis: 

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu za pravidelné konzultace při tvorbě této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá impulsní metodou měření cívek, při které je snímána odezva na vysokonapěťový puls. Teoretická část seznamuje se základními parametry cívek a tlumivek, jako je indukčnost, parazitní kapacita, odpor, rezonanční a mezní frekvence, maximální proud a maximální napětí. Dále obeznamuje se základními typy zvyšujících měničů, které jsou potřebné pro nabití kondenzátoru vysokonapěťového testeru na napětí v řádech kilovoltů. Nakonec popisuje samotnou impulsní metodou testování cívek, která dokáže identifikovat zkratky vinutí, průrazy na kostru a řadu dalších poruch. Je zde také provedena simulace s virtuální cívkou o náhodných parametrech.

V praktické části diplomové práce je hlavním tématem tvorba prototypu měřicího zařízení s omezeným rozsahem napětí z důvodu bezpečnosti. Nejdříve je vytvořeno simulační schéma obvodu zvyšujícího měniče v softwaru Microcap od firmy Spectrum Software. Následně je navržena deska plošných spojů v prostředí Eagle firmy Autodesk. Současně je naprogramována řídicí jednotka Arduino Nano včetně komunikačních periférií, jako je LCD zobrazovač, klávesnice a komunikační USB rozhraní, v jazyce Wiring. Desky plošných spojů, LCD, klávesnice a konektory jsou nainstalovány do plastové krabičky opatřené popisky. Nakonec je provedeno kontrolní měření s různými vzorky cívek s uměle vytvořenými defekty. Měření jsou zobrazena do grafů pro porovnání.

Klíčová slova

Impulsní metoda měření cívek, indukčnost, rezonanční kmitočet LC obvodu, DC-DC měnič, Step-Up měnič, USB-TTL převodník, Arduino Nano, osciloskop

Abstract

This diploma thesis is about the Impulse testing of coils and magnets where a high voltage impulse response is watched. The theoretic passage introduces main parameters of coils like inductance, parasitic capacitance, resistance, resonance frequency, corner frequency, maximum current and voltage. Next there are described some types of high voltage DC-DC converters which are needed to charge a capacitor of the tester for kilovolts. In conclusion, the coil testing method itself is described. This method is able to detect winding insulation failure and short-circuit to the coil core and many more failures. This is verified by simulation with a virtual coil with random parameters.

The main theme of the practical passage is creating a prototype of measure device with limited range of output voltage due to safety. First, there is created a simulation scheme of the boost converter in the software Microcap by company Spectrum Software. Next the Printed circuit board is designed in the software Eagle by Autodesk. The main control unit Arduino Nano is also programmed in the Wiring language with communication peripherals like Liquid Crystal Display, keyboard and USB connect interface. Then these ones and connectors are installed to a plastic cover with labels. At the end the control measures with some types of perfect and artificially defected coils are executed. Their impulse characteristics are scoped for comparisons.

Keywords

Impulse testing of coils, inductance, resonance frequency of LC circuit, DC-DC converter, Step-Up converter, USB-TTL converter, Arduino Nano, oscilloscope

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	11
Seznam obrázků	12
Seznam kódů	13
Úvod.....	12
1 Teorie	13
1.1 Vlastnosti cívek.....	13
1.1.1 Indukčnost	13
1.1.2 Mezní frekvence	14
1.1.3 Parazitní kapacita, mezizávitové kapacity.....	15
1.1.4 Činitel jakosti.....	16
1.1.5 Maximální proud	17
1.1.6 Maximální napětí.....	17
1.2 Zdroj vysokého napětí	18
1.2.1 Step-Up měnič	18
1.2.2 Transformátorový měnič	19
1.2.3 Násobič napětí	21
1.3 Měření vysokého napětí.....	22
1.4 Impulsní testování cívek a elektromagnetů	23
1.4.1 Simulace v prostředí Microcap.....	26
2 Praktická část	28
2.1 Návrh řízeného zdroje vysokého napětí.....	28
2.1.1 Rešerše.....	28
2.1.2 Vlastní návrh	31
2.1.3 Schéma zapojení v návrhovém softwaru	34
2.1.4 Deska plošných spojů	40
2.1.5 Program pro řídicí jednotku.....	41
2.2 Zhotovení výrobku.....	52
2.3 Oživení výrobku	54
2.4 Měření na přípravku.....	55
2.4.1 Toroidní cívka	56
2.4.2 Zvyšující transformátor	56
3 Závěr	58

Seznam použité literatury	60
Seznam příloh na CD	62

Seznam zkratk a symbolů

A	Ampér
AC	střídavý proud
C	kapacita
D	dioda
DC	stejnsměrný proud
DPS	deska plošných spojů
<i>f</i>	frekvence, kmitočet
<i>I</i>	proud
<i>idn</i>	identifikace
<i>j</i>	imaginární jednotka komplexního čísla
J	Joule
<i>l</i>	délka
L	indukčnost, cívka
LCD	Liquid Crystal Display (zobrazovač z tekutých krystalů)
μA	mikroampér
m	metr
mA	miliampér
max	maximum
min	minuta, minimum
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
mV	milivolt
mW	miliwatt
Ω	ohm
<i>P</i>	výkon, příkon
<i>R</i>	odpor
<i>rem</i>	Remote Control (dálková obsluha)
<i>rst</i>	Reset
SMD	Surface Mount Device (součástka pro povrchovou montáž)
THT	Through-hole Technology (součástka s drátovými vývody)
<i>tol</i>	tolerance
TTL	Transistor-Transistor Logic
<i>U</i>	napětí
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
<i>U_{out}</i>	výstupní napětí
kV	kilovolt
V	volt
W	watt
Wb	Weber
Z	impedance

Seznam obrázků

Obrázek 1: Frekvenční závislost absolutní hodnoty impedance cívky s parametry: $L = 20 \text{ mH}$, $R = 2 \Omega$ a $C = 1 \text{ nF}$. Vyznačeny jsou mezní a rezonanční kmitočty.	16
Obrázek 2: Principiální schéma Step-Up měniče s indukčností, převzato z: https://uart.cz/952/dc-dc-menice/	18
Obrázek 3: Principiální schéma blokujícího měniče. Zdroj: http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/snt/snt_eng/snteng3b.pdf	20
Obrázek 4: Principiální schéma propustného měniče. Zdroj: http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/snt/snt_eng/snteng4.pdf	20
Obrázek 5: Schéma násobiče napětí, převzato z: https://cs.wikipedia.org/wiki/N%C3%A1sobi%C4%8D_nap%C4%9Bt%C3%AD#/media/File:Voltage_multiplier_villard.svg	21
Obrázek 6: Průběh napětí na dvojnásobném násobiči s kondenzátory 1000 nF . Červenou barvou je vstup, modrou výstup. Žlutou je napětí na prvním kondenzátoru.	22
Obrázek 7: Kapacitně kompenzovaný dělič	23
Obrázek 8: Princip impulsní metody[2]. Vlevo schéma, vpravo graf. V zakroužkované části je vidět chyba cívky způsobená průrazem mezi závity.....	24
Obrázek 9: Příklad impulsní charakteristiky špatné cívky se zkraty mezi vrstvami vinutí.	25
Obrázek 10: Náhradní obvod reálné cívky. [2] Parametr C_p je kapacita mezi závity, C_g kapacita mezi cívkou a zemí, R odpor vinutí a L_x a R_x jsou ztráty způsobené vířivými proudy u střídavého proudu.....	25
Obrázek 11: Testování vybraných cívek připojených ke zdroji.	26
Obrázek 12: Schéma metody pro impulsní měření cívek	26
Obrázek 13: Graf průběhu napětí na kondenzátoru (zeleně), na cívce (modře) a graf průběhu proudu cívkou v mA (fialově).....	27
Obrázek 14: Blokové schéma impulsního testeru.....	28
Obrázek 15: Schéma zapojení blesku značky Kodak. Autor: Donald Klipstein, zdroj: http://donklipstein.com/kmaxhack.html	29
Obrázek 16: Schéma měniče řízeného výstupem z jednotky Arduino. Autor: C. J. Abate, zdroj: http://circuitcellar.com/ee-tips/arduino-based-diy-voltage-booster-ee-tip-117/	30
Obrázek 17: Zvyšující DC-DC měnič pro Geiger-Müllerovu trubici. Zdroj: https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3757	30
Obrázek 18: Schéma zapojení zářivkového nouzového svítidla. Zdroj: http://www.amapro.cz/datove_zdroje/ar/konstrukce_ar_1/ar1_291.php	31
Obrázek 19: Schéma měniče v simulačním prostředí Microcap	32
Obrázek 20: Graf nabíjení kondenzátoru C_1	33
Obrázek 21: Detail spínání a nabíjení cívky. Šedou je desetinásobek napětí na výstupu Arduina ve V, žlutou je proud cívkou v mA. Azurová je efektivní hodnota proudu cívkou.....	33
Obrázek 22: Závislost střídy a výstupního napětí při kmitočtu $5882,35 \text{ Hz}$	34
Obrázek 23: Schéma zapojení měřicího zařízení v programu Eagle	36

Obrázek 24: Schéma zapojení maticové klávesnice 4×4. Potenciály označené S1 – S4 jsou připojeny k pinům 4 – 1 (sestupně) a potenciály R1 – R4 k pinům 8 – 5.	37
Obrázek 25: Spodní strana plošného spoje LCD displeje. V pravém horním rohu se nachází modul I2C s potenciometrem nastavujícím kontrast.	38
Obrázek 26: Schéma zapojení opticky izolovaného komunikačního rozhraní.	39
Obrázek 27: Svrchní i horní část navrhované desky plošných spojů v programu Eagle. Modrá barva značí cesty ve spodní vrstvě, červená v horní.	41
Obrázek 28: Stavový diagram programu. Červenou barvou jsou znázorněny hlavní stavy, zelenou barvou inicializační mezi-stavy (změna textu LCD). Žlutá barva označuje podmínky přechodů mezi stavy.	42
Obrázek 29: Pohled na zařízení s displejem při inicializaci.	45
Obrázek 30: Displej při stavu místní obsluhy.	46
Obrázek 31: Stav displeje při zadání z klávesnice s blikajícím kurzorem.	47
Obrázek 32: Stav displeje po skončení měření.	51
Obrázek 33: Stav displeje při dálkovém ovládní.	51
Obrázek 34: Osazení zařízení v pultové krabičce. V horní části obrázku je odklopené víko s displejem, klávesnicí, konektory a svorkami pro cívku. V dolní části se nachází deska plošných spojů (vpravo) se svorkami pro připojení pinů klávesnice a komunikačního rozhraní (vlevo).	53
Obrázek 35: Pohled na zařízení svrchu.	54
Obrázek 36: Kryt zařízení s nalepenými popisky nad konektory. <i>TRG</i> je externí spoušť osciloskopu, <i>OUT</i> je výstupní napětí z měřicího děliče, <i>DC 12 V</i> je napájecí vstup a <i>COM</i> je komunikační rozhraní.	55
Obrázek 37: Měřené cívky. Zeleným obdélníkem jsou vyznačena místa, kde byl vytvořen zkrat.	55
Obrázek 38: Odezva toroidní cívky pro testovací napětí 1 kV.	56
Obrázek 39: Odezva transformátoru pro různé, uměle vytvořené, defekty.	57
Obrázek 40: Detail odezvy pro první část. Zde jsou viditelné zákmity při výboji.	57

Seznam kódů

Kód 1: Definice maker a symbolických konstant.	43
Kód 2: Deklarace globálních proměnných a definice periférií.	44
Kód 3: Inicializace zařízení po připojení k napájení.	45
Kód 4: Čtení sériové linky a reakce na univerzální podněty.	46
Kód 5: Úsek programu pro klidový stav – režim místní obsluhy.	47
Kód 6: Úsek programu pro stav zadání hodnoty výstupního napětí.	48
Kód 7: Úsek programu pro stav nabíjení kondenzátoru.	49
Kód 8: Úsek programu pro stav vybíjení kondenzátoru – měření.	50
Kód 9: Úsek programu pro stav konce měření.	50
Kód 10: Úsek programu pro klidový stav při režimu dálkové obsluhy.	51

Úvod

Problematika cívek je velmi široká. Indukčnosti se využívá snad ve všech oborech elektrotechniky – ve frekvenčních filtrech, při spínání výkonových obvodů – relé, v elektromotorech, měničích napětí, nabíječkách na domácí spotřebiče, zářivkách, trakčních vozidlech, měřicí technice... Dokonce i samotný vodič má nějakou indukčnost a jiné parametry ovlivňující jeho vlastnosti. Ovšem v tomto světě platí, že nic není ideální, takže i cívka má určité parametry, které zde musíme trpět, říkejme jim parazitní. Některé aplikace jsou na ně velmi citlivé, takže je potřeba je před instalací do zařízení nějakým způsobem změřit.

Klasické RLC měřiče používají frekvenční měření, kdy se generátorem střídavého napětí vytvoří harmonické funkce o různých frekvencích a těmi se poté budí připojený přípravek. Z naměřeného fázového posunu a poklesu amplitudy proudu vůči napětí se určí indukčnost, kapacita a odpor, ale také činitel jakosti, činitel kvality a úhel natočení. Tato metoda však díky nízkému napětí neumožňuje odhalovat zkratky ve vinutí. Ale existují i jiné metody.

Jednou z nich je takzvaná impulsní metoda měření cívek pomocí vysokonapěťového pulsu. Principem je nabití kondenzátoru na napětí v řádech kilovoltů a poté pomocí vhodného spínače připojení k měřené cívce, čímž dojde k vyvolání oscilací. V první části naměřené charakteristiky, kdy je spínač zapnut, se uplatňuje zejména kapacita měřicího kondenzátoru. Poté dojde k vypnutí spínače a nyní se uplatňují pouze parazitní kapacity cívky. Z frekvencí kmitů a jejich útlumu lze poté vypočítat parametry cívky. Tato metoda je i předmětem této diplomové práce.

Určitě se mnoho z Vás sami sebe zeptají, jestli to nemůže někoho zabít. Vzhledem k bezpečnostním předpisům je zde nutno použít omezené napětí a energii. Bude vytvořen prototyp s maximálním měřicím napětím 1000 V uloženém v kondenzátoru o kapacitě 10 nF. To odpovídá energii 5 mJ, což by nemělo ohrozit zdraví. Uvolněná energie má podobné účinky, jako elektrostatický výboj.

Přístroj by měl umožňovat následující věci: měnit velikost napětí v rozumném měřítku, být uživatelsky komfortní a případně komunikovat s počítačem. Tím by se dala vytvořit společně s osciloskopem kompaktní měřicí soustava, kdy se povel z vhodného prostředí na počítači nastaví hodnota výstupního napětí a spustí měření. Současně se vyše povel do osciloskopu pro nastavení vodorovné a svislé osy a spuštění měření. Po skončení měření dojde k přenosu dat z digitálního osciloskopu do počítače a uložení do souboru pro následnou analýzu. Napájení přípravku by mělo být z bezpečného zdroje stejnosměrného malého napětí, který bude zásobovat jak vysokonapěťový měnič, tak i řídicí obvody včetně mikropočítače. Nejvhodnější je napětí 12 V, které je jednak dostatečné pro funkci polovodičových spínacích součástek, jednak snesitelné i pro napájení řídicí jednotky. Může být použit jak síťový zdroj, tak i bateriový. Součástky, zejména ty na výstupní straně obvodu, musí být konstruovány na napětí minimálně 1000 V, aby nedošlo k jejich průrazu a zničení.

1 Teorie

1.1 Vlastnosti cívek

1.1.1 Indukčnost

Indukčnost je fyzikální veličina, která charakterizuje schopnost vodiče protékaného elektrickým proudem kolem sebe vytvářet magnetické pole. Platí, že čím větší je indukčnost L při konstantní velikosti proudu I , tím vyšší indukční tok φ ve smyčce a okolo ní vznikne

$$L = \frac{\varphi}{I}, \quad (1.1)$$

Indukčnost cívky je odvislá od několika parametrů – počet závitů, rozměry cívky a permeabilita jádra (schopnost materiálu působit na výsledné účinky magnetické pole). Velikost indukčnosti je dána tvarem, rozměry a materiálem jádra. Pro nejčastější varianty cívek platí.

Přímý drát o délce l bez skinefektu

$$L = \mu_0 \mu_r \left(\ln \frac{2l}{r_0} - \frac{3}{4} \right), \quad (1.2)$$

Indukčnost solenoidu:

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{S \cdot N^2}{l}, \quad (1.3)$$

Pro tenký toroid ($r \ll R$) s kruhovým průřezem jádra:

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{S \cdot N^2}{2\pi R} = \mu_0 \mu_r \frac{r^2 \cdot N^2}{2R}, \quad (1.4)$$

A pro toroid s obdélníkovým průřezem ($b \ll R$)

$$L = \mu_0 \mu_r \frac{a \cdot N^2}{2\pi} \ln \frac{2R+b}{2R-b}, \quad (1.5)$$

Plochá spirálová cívka se vzduchovým jádrem

$$L = \frac{r^2 \cdot N^2}{(2r+2,8d)} \cdot 10^{-5}, \quad (1.6)$$

kde μ_0 permeabilita vakua (jednotka Hm^{-1}), μ_r relativní permeabilita (bezrozměrná veličina), S plocha závitů (m^2), r poloměr jádra (m), a rozměr rovnoběžný s osou kružnice (m), b rozměr souběžný s osou (m) a d hloubka cívky (m). R je poloměr prstence toroidu (m), N počet závitů a l délka cívky (m).

Podle Faradayova indukčního zákona se při změně proudu indukuje tzv. elektromotorické napětí, jehož velikost je dána součinem indukčnosti a časové derivace proudu. Platí, že při indukčnosti vodiče 1 Henry se při změně proudu o 1 A za 1 sekundu indukuje napětí 1 V.

$$U_i = -N \cdot \frac{d\varphi}{dt} = -L \cdot \frac{dI}{dt}, \quad (1.7)$$

kde φ je indukční tok (jednotka Wb), t je čas (jednotka s) a I je proud (A).

V elektromechanické analogii indukčnost odpovídá hmotnosti, v rotačním pohybu momentu setrvačnosti, takže při zapnutí dochází k postupnému nárůstu proudu (rychlosti u mechaniky). Při vypnutí působí na obvod elektromotorické napětí (~setrvačná síla).

V obvodech střídavého proudu způsobuje indukčnost cívky fázový posuv napětí vůči proudu. Proud se zpožďuje o 90 stupňů za napětím vlivem tzv. indukčnosti (přesněji induktivní reaktance). Reaktance je zdánlivý odpor v obvodech střídavého napětí, kde se energie nespotebovává na teplo jako u rezistorů, ale uchovává buďto jako indukční tok (induktivní reaktance) nebo elektrický náboj (kapacitní reaktance). Reaktance jsou imaginární složkou impedance.

$$Z_L = j\omega L = j \cdot 2\pi f \cdot L, \quad (1.8)$$

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j \cdot 2\pi f \cdot C}, \quad (1.9)$$

kde Z_L je indukčnost, j imaginární jednotka, ω úhlová frekvence, f frekvence, L indukčnost, Z_C je kapacitance a C kapacita kondenzátoru.

1.1.2 Mezní frekvence

Reálná cívka vykazuje odpor použitého vodiče. Pro zjednodušení uvažujme sériovou kombinaci induktoru a rezistoru připojenou na napěťový zdroj harmonického signálu. Podle Kirchhoffových zákonů vyjádříme vztah pro proud:

$$I = \frac{U}{X_R + X_L} = \frac{U}{R + j\omega L} = \frac{U}{R + j2\pi fL}, \quad (1.10)$$

kde U je amplituda napětí zdroje. Po vydělení jmenovatele i čitatele odporem R získáme tzv. stejnosměrný proud I_0 (při nulové frekvenci, kdy se uplatňuje pouze rezistance) a časovou konstantu τ (ta charakterizuje také dobu nárůstu proudu při stejnosměrném napájení).

$$I = \frac{\frac{U}{R}}{1 + j2\pi f \frac{L}{R}} = \frac{I_0}{1 + j2\pi f\tau} = \frac{I_0}{1 + j\frac{f}{f_m}} = \frac{I_0(1 - j\frac{f}{f_m})}{1 + \frac{f^2}{f_m^2}}. \quad (1.11)$$

Samotná cívka tedy funguje jako dolní propust. Mezní frekvence je místo v logaritmickém amplitudovém spektru, kdy dochází k poklesu amplitudy o 3 dB. Logaritmický graf lze aproximovat dvojicí přímkou – vodorovnou a klesající 20 dB na dekádu (asymptota ke klesající charakteristice). Jejich průsečík je mezní frekvence.

$$f_m = \frac{R}{2\pi L} = \frac{1}{2\pi\tau}. \quad (1.12)$$

Jako důkaz vyjádříme amplitudu v logaritmických jednotkách a dosadíme mezní frekvenci

$$|I| = 20 \log \left(\frac{|I|}{I_0} \right) = 20 \log \left(\frac{\left| \frac{I_0 \left(1 - j \frac{f}{f_{3dB}} \right)}{1 + \frac{f^2}{f_{3dB}^2}} \right|}{I_0} \right). \quad (1.13)$$

$$|I_M| = 20 \log \left(\frac{|I_M|}{I_0} \right) = 20 \log \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right) = -3,01 \text{ dB} . \quad (1.14)$$

1.1.3 Parazitní kapacita, mezizávitové kapacity

Z principu tvoří závitů cívky parazitní kondenzátory. Jejich uspořádání je závislé na konstrukci cívky. Uplatňují se kapacity mezi jednotlivými závitů, mezi vrstvami vinutí i mezi vinutím a konstrukčními díly. Parazitní kapacita omezuje frekvenční rozsah použitelnosti cívky.

Situace se nejčastěji modeluje jako paralelní kombinace induktoru a kapacitoru, ve složitějších případech jako obecná LC nebo RLC síť. Uplatňuje se rezonance, což je stav, kdy při určité frekvenci má systém tendenci kmitat více, než při ostatních. Napětí a proud mají vůči sobě nulový fázový posun, tedy komplexní impedance je reálná a účinník roven 1. Vztah pro rezonanční frekvenci lze odvodit z obvodové rovnice paralelního LC obvodu

$$Z_L + Z_C = 0 , \quad (1.15)$$

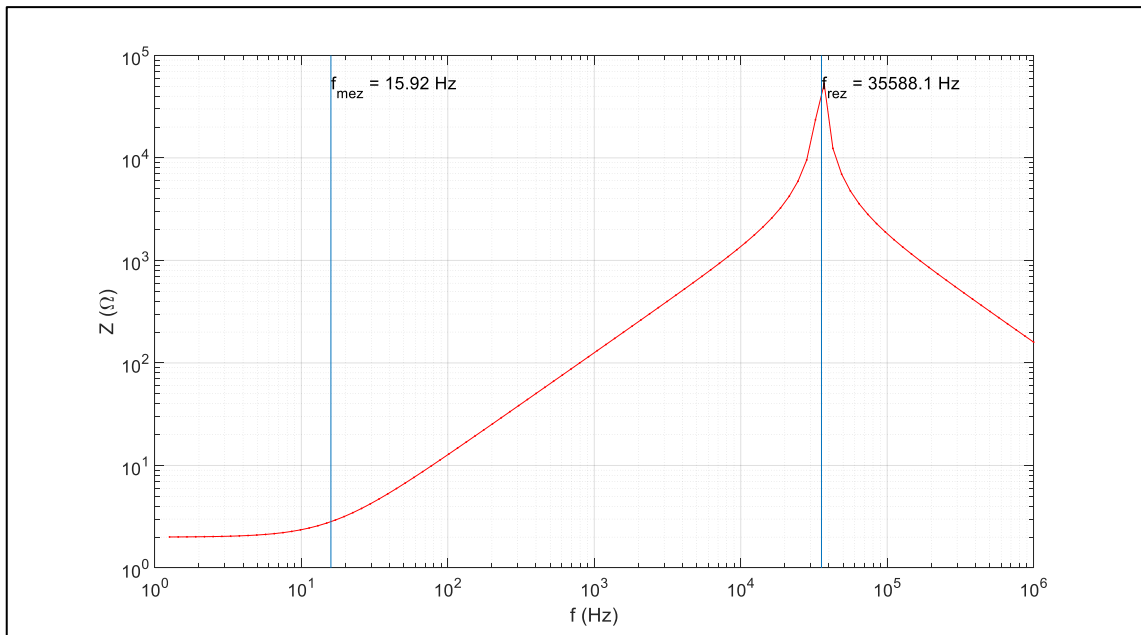
$$j\omega L = -\frac{1}{j\omega C} \quad (1.16)$$

po úpravě získáme tzv. Thomsonův vztah pro rezonanční frekvenci

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} . \quad (1.17)$$

Při znalosti kapacity kondenzátoru a změření frekvence kmitů po vybuzení impulsem vysokého napětí lze tedy vypočítat indukčnost cívky.

Rezonance je také použita při testování cívek. Tester připojuje k cívce měřicí kondenzátor. Měření probíhá v rezonančním režimu nejprve s tímto kondenzátorem a po rozpojení obvodu tyristorem s parazitními kapacitami samotné cívky.



Obrázek 1: Frekvenční závislost absolutní hodnoty impedance cívky s parametry: $L = 20 \text{ mH}$, $R = 2 \Omega$ a $C = 1 \text{ nF}$. Vyznačeny jsou mezní a rezonanční kmitočty.

1.1.4 Činitel jakosti

Činitel jakosti je další z důležitých parametrů cívek, neboť reálné cívky mají též parazitní parametry jako odpor a kapacita. Podobně jako reálné kondenzátory mají též parazitní indukčnosti a odpor. Udává, kolik energie se uloží v prvku a kolik energie se nenávratně změní na teplo. Definován je jako poměr maximální energie E naakumulované na prvku a energie přeměněné na ztráty E_T za jednu periodu.

$$Q = 2\pi \cdot \frac{E}{E_T}. \quad (1.18)$$

Energie disipovaná za jednu periodu je definována jako součin průměrného výkonu na rezistoru a periody $1/f$. Maximální energie uložená v cívce je definována jako polovina součinu indukčnosti a kvadrátu proudu.

$$E_T = \frac{I_M^2 R}{2f}, \quad (1.19)$$

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1.20)$$

Po dosazení tedy

$$Q = 2\pi \cdot \frac{\frac{1}{2} LI^2}{\frac{I_M^2 R}{2f}} = \frac{2\pi f L}{R} = \frac{\omega L}{R}. \quad (1.21)$$

Odpor vinutí způsobuje exponenciální útlum amplitudy vlny při impulsním měření. Platí, že čím vyšší frekvence, tím více se projevují odporové ztráty. Cívky s vysokým

činitelem jakosti se hodí pro filtrování konkrétní frekvence, naopak cívky s nižším Q se používají pro filtrování širšího okruhu frekvencí.

1.1.5 Maximální proud

Na pouzdru cívky jako součástky je kromě indukčnosti obvykle uveden i druhý nejdůležitější parametr – maximální proud. Každá cívka má vinutí s nenulovým odporem. Ten způsobuje, že při průchodu proudem se část energie mění na Jouleovo teplo, a to se čtvercem proudu. Příliš vysoký proud znamená vyšší ohřev vinutí, což může způsobit degradaci izolace a zničení cívky.

1.1.6 Maximální napětí

Méně často uváděným parametrem je též maximální napětí. K oddělení závitů vinutí je potřeba použít izolaci, nejčastěji smaltovanou. Každý izolant se však vyznačuje určitou dielektrickou pevností, která udává odolnost proti elektrickému poli. Při překročení průrazného napětí U_p dochází k průrazu, kdy se materiál stává vodivým vlivem ionizace atomů. Jednotkou je V/m. Definice zní takto:

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (1.22)$$

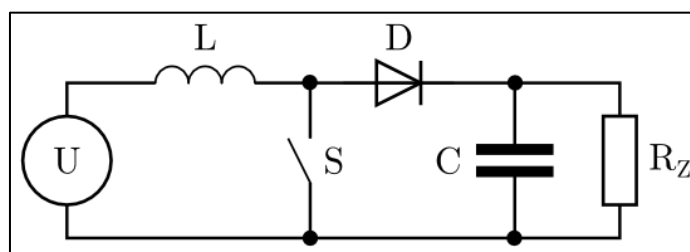
kde d je vzdálenost mezi vodiči. Tento parametr bývá uváděn v tabulkách, avšak je třeba počítat s tím, že izolace má často vady, takže skutečné číslo pevnosti je menší. U vysokonapěťových cívek musí být tloušťka izolace větší, než u nízkonapěťových. Při přepětí může dojít vlivem působení elektrického pole k degradaci izolace a zničení cívky.

1.2 Zdroj vysokého napětí

U impulsního testování cívek dochází k vybuzení LC obvodu vlivem vysoko-napěťového impulsu nabitého kondenzátoru, když dochází k připojení testovaného vinutí ke kondenzátoru pomocí spínače (relé, tyristor nebo tranzistor). Aby bylo možné kondenzátor na napětí v řádech kilovoltů nabít, je potřeba nejdříve napětí zvýšit pomocí nějakého měniče, jehož výstup je připojen přes usměrňovací diodu na svorky kondenzátoru. Měnič je při tom napájen malým stejnosměrným napětím. Realizace je možná několika způsoby – střídač + transformátor, nábojová pumpa nebo Step-Up měnič s indukčností, případně jejich kombinace.

1.2.1 Step-Up měnič

Též Boost converter je typ zvyšujícího DC-DC měniče založeného na již zmiňovaném Faradayově zákonu. Na obrázku níže je uvedeno schéma.



Obrázek 2: Principiální schéma Step-Up měniče s indukčností, převzato z: <https://uart.cz/952/dc-dc-menice/>

Základem je indukční cívka L , která slouží k indukci vysokého napětí, kterým se přes diodu D nabíjí kondenzátor C . Indukce však probíhá pouze při změně proudu cívkou. Proto je zde spínač S , tvořený většinou tranzistorem, který s určitou periodou a střídou vypíná a zapíná proud ze zdroje napětí U . Při stavu zapnuto je připojen (na obrázku) levý konec cívky na kladné napětí, elektromotorické napětí působí proti směru proudu, který pozvolna stoupá, až se přiblíží asymptotě maxima. Při náhlém vypnutí spínače S dojde z prudké změně velikosti proudu, cívka však z důvodu indukčnosti se brání změně a naindukuje napěťovou špičku mnohonásobně přesahující napětí zdroje U , který je v tom okamžiku řazen sériově – obě napětí se sčítají. Protože proud již nemůže projít spínačem S , tak přes diodu D nabíjí kondenzátor C . Pokud má dostatečnou kapacitu, dojde k částečnému vyhlazení průběhu proudu na výstupu R_Z .

Měnič může pracovat ve dvou módech, tzv. spojitým a nespojitým.[10] Spojitý mód se vyznačuje tím, že proud induktorem neklesá k nule a na tranzistoru dochází k tvrdému spínání. Velikost výstupního napětí je regulovatelná pomocí střídavy D , což je poměr času t_z zapnutého stavu vůči periodě T , podle zjednodušeného vzorce (nezahrnuje strmou hran a vnitřní odpor)

$$U_{out} = \frac{1}{1-D} \cdot U_{in} , \quad (1.23)$$

neboť při nízké střídě se proud nestihne dostatečně „rozeběhnout“ a při následném přerušení tedy dochází k menší změně proudu, což má za následek menší indukované

napětí. Při střídě 1 je velikost výstupního napětí teoreticky rovna nekonečnu, což však v praxi není možné, neboť pak nedojde ke změně proudu.

Při nespojitém módu naopak proud induktorem klesá k nule a na tranzistoru vlivem měkkého spínání dochází k nižším ztrátám. Ovšem výstupní napětí závisí kromě střídý také na frekvenci spínání, indukčnosti a odebíraném proudu

$$U_{out} = U_{in} \left(1 + \frac{U_{in} D^2 T}{2L I_{out}} \right). \quad (1.24)$$

Výhodou tohoto typu měniče je jeho relativní jednoduchost a malý počet součástek. Nevýhodou je, že tento typ není odolný vůči zkratu a také to, že je velmi složité zkonstruovat měnič pro velmi nízké výkony a vysoká napětí, neboť při malém proudu musí být indukčnost cívky velmi vysoká, což komplikuje dostupnost na trhu. Účinnost měniče je závislá na zatížení.

1.2.2 Transformátorový měnič

Výhodou tohoto typu je vysoká účinnost, robustnost a univerzálnost, je použitelný i pro velké výkony. Hlavní výhodou je však galvanické oddělení sekundárního napětí. Nevýhodou je hmotnost, cena a také dostupnost vhodného typu transformátoru.

Obecně známým faktem je, že transformovat lze pouze střídavý proud. Pro obvody stejnosměrného napětí je proto potřeba budicího oscilátoru. Nejjednodušší je tzv. Wagnerovo kladívko, mechanický přerušovač, jaký se používá např. u stejnosměrného zvonku nebo Ruhmkorffova transformátoru. Nevýhodou je silné jiskření přerušovače, které je potřeba odrušit RC obvodem, a špatná možnost regulace.

Také lze použít některého typu elektronického oscilátoru vyrábějícího periodický průběh napětí. Nejjednodušší je obdélníkový, nejsložitější harmonický, který je ovšem nejideálnější.

Transformátorové měniče se dají rozdělit na více speciálních typů, nejznámější jsou blokující (Flyback) a propustné (Forward), které jsou regulovatelné pomocí střídý podobně, jako Step-up.

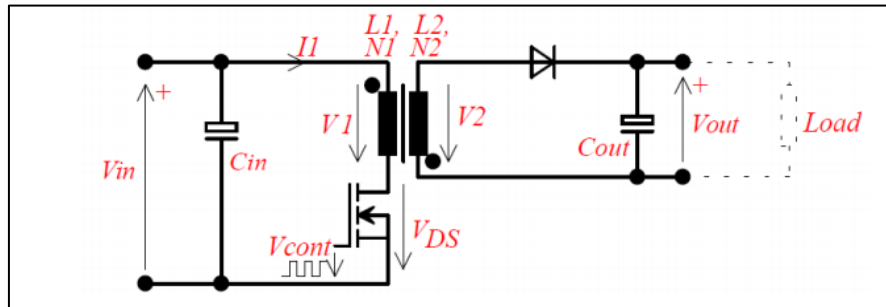
1.2.2.1 Blokující měnič

Speciální kapitolou transformátorových měničů jsou tzv. nepřímé blokující (neboli Flyback) měniče. Patří mezi měniče se spínáním primárního vinutí transformátoru. Transformátor má sekundární vinutí v opačném smyslu, než primární. Primární vinutí je napájeno obdélníkovým proudem, stejnosměrný proud do vinutí je přerušován spínacím tranzistorem, který díky galvanickému oddělení nepotřebuje být vysokonapěťový. Velikost výstupního napětí je, podobně jako u Step-Up měničů, určeno střídou PWM modulace. [10]

Měnič funguje takto. Při sepnutí tranzistoru začne protékat primárním vinutím proud a zároveň se na primární vinutí dostane napětí. Sekundární vinutí je v opačném smyslu a ve smyčce je dioda v závěrném směru, proto se sekundární vinutí v této fázi

neuplatňuje a energie se hromadí v magnetickém obvodu transformátoru. Jakmile dojde k vypnutí tranzistoru, naakumulovaná energie se přes diodu uvolní do kondenzátoru a zátěže. V podstatě se jedná o invertující měnič, který má místo tlumivky transformátor o primárním vinutí N_p a sekundárním vinutí N_s . Vzorec pro spojitý mód vypadá následovně

$$U_{out} = U_{in} \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{D}{1-D} \quad (1.25)$$



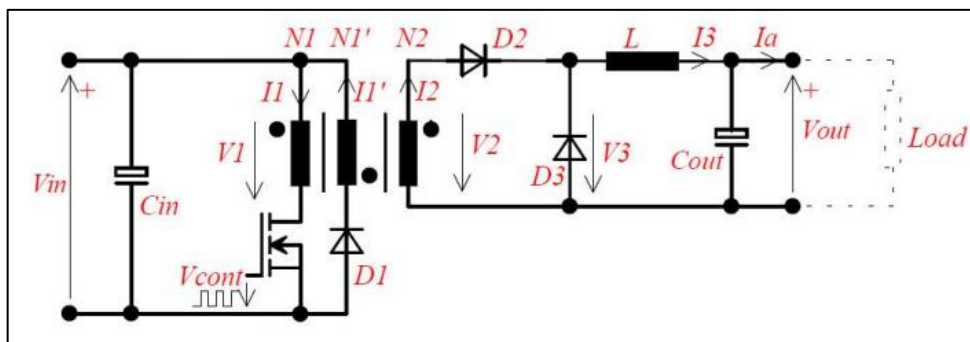
Obrázek 3: Principiální schéma blokovacího měniče.

Zdroj: http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/snt/snt_eng/snteng3b.pdf

Transformátor u tohoto typu není klasický, nýbrž má vzduchovou mezeru, neboť jeho úkolem není energii pouze transformovat, ale ukládat ji v jádře a vzduchové mezeře. Proto také musí být transformátor rozměrnější, než u propustných (Forward) měničů.

1.2.2.2 Propustný měnič

Propustný (přímý) měnič je ve své podstatě snižující měnič, doplněný transformátorem s převodem $\frac{N_s}{N_p}$, který neslouží k ukládání energie, ale jejímu převodu na sekundární stranu v okamžiku sepnutí. Na rozdíl od Flyback měniče je zde totiž sekundární strana transformátoru vinuta souhlasně, a tak v okamžiku průchodu proudu primární stranou prochází i na sekundární. Proto nemusí mít vzduchovou mezeru ani být příliš rozměrný. Ovšem výpočty pro dimenzování jsou složitější, neboť se jedná o nelineární prvek.



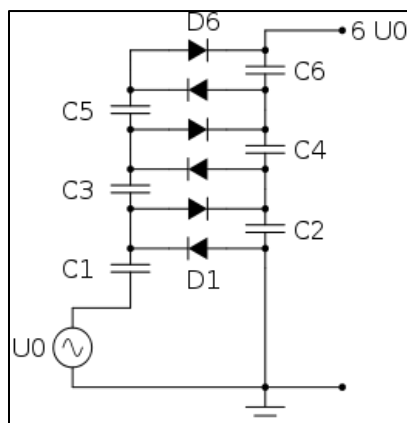
Obrázek 4: Principiální schéma propustného měniče.

Zdroj: http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/snt/snt_eng/snteng4.pdf

Nevýhodou tohoto typu transformátoru je, že v okamžiku vypnutí tranzistoru se uvolňuje akumulovaná energie ve formě nebezpečných napěťových špiček na primární straně. Tento problém je často řešen opačně orientovaným rekuperačním vinutím, které přes diodu $D1$ vrací proud do zdroje, čímž se zvyšuje účinnost. Na sekundární straně se nachází vyhlazovací obvod tvořený tlumivkou L , kondenzátorem C_{out} a diodou $D3$. Slouží k omezení nárůstu sekundárního proudu v okamžiku sepnutí tranzistoru, v okamžiku vypnutí vlivem „setrvačnosti“ tlumivka dodává naakumulovanou energii dále do spotřebiče (podobně jako u snižujících měničů), čímž se omezí ztráty ve vinutí transformátoru. Současně na primární straně energii magnetického obvodu transformátoru přebírá rekuperační vinutí zpět do zdroje.

1.2.3 Násobič napětí

Na rozdíl od předchozích typů měničů zde jako akumulační člen není použita cívka, ale skupina kondenzátorů, které se střídavě nabíjejí a vybíjejí v rytmu střídavého proudu. Základní premisou je, že při nabíjení jsou kapacity spojeny paralelně – sčítají se vstupní proudy a napětí je konstantní. Ovšem při vybíjení jsou kapacity spojeny sériově a tedy výsledné napětí je součtem napětí na všech kondenzátorech. Do obvodu musí být však dosazeno velké množství vhodně zapojených polovodičových diod, které výsledné napětí o nějaké procento snižují.

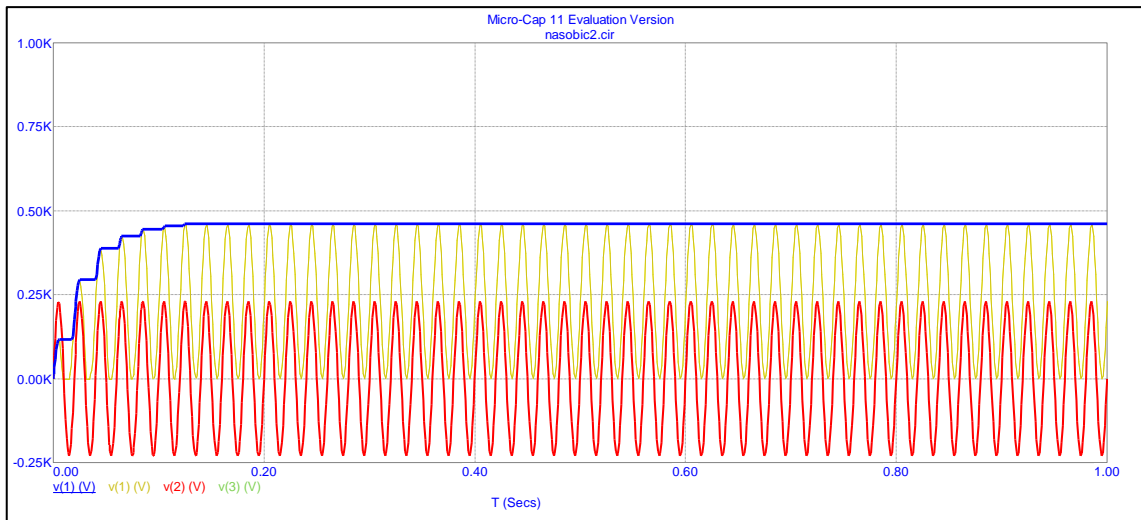


Obrázek 5: Schéma násobiče napětí, převzato z:

https://cs.wikipedia.org/wiki/N%C3%A1sobi%C4%8D_nap%C4%9Bt%C3%AD#/media/File:Voltage_multiplier_villard.svg

Obvod násobiče napětí je použitelný pouze pro obvody střídavého proudu. Při použití v DC-DC měniči je potřeba použít budič tvořený oscilátorem. Nejjednodušší je použití H-můstku ovládaného některým typem obvodu pro spínaný zdroj. Výstupem je obdélníkový průběh. Ten obsahuje řadu vyšších harmonických, které způsobují zahřívání elektrolytických kondenzátorů. Proto je výhodnější použít buzení, které se blíží harmonickému.

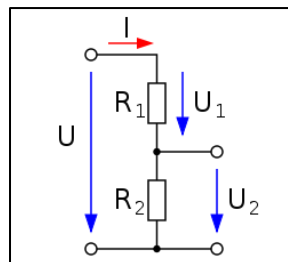
Tento typ je vhodný pro nízké výkony cca do 30 W. Pro vyšší zatížení klesá účinnost. Nevýhodou je také velké množství součástek.



Obrázek 6: Průběh napětí na dvojnásobném násobiči s kondenzátory 1000 nF. Červenou barvou je vstup, modrou výstup. Žlutou je napětí na prvním kondenzátoru.

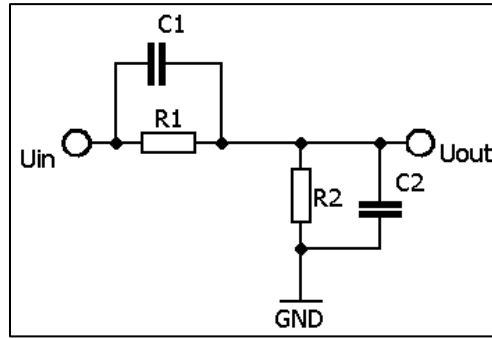
1.3 Měření vysokého napětí

Jednak pro zpětnovazební řízení napěťového zdroje, ale také hlavně pro měření na osciloskopu je nutno snímat hodnotu napětí na výstupním kondenzátoru. Protože napěťový rozsah osciloskopů a měřicích karet je omezený, je potřeba vysoké napětí v řádech kilovoltů vydělit vhodně zvolenou konstantou. Nejjednodušší je použití odporového napěťového děliče



$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} . \quad (1.26)$$

Sériovým spojením dvou rezistorů však protéká svodový proud I_2 , který zatěžuje zdroj napětí. Proto musí být hodnoty odporu dostatečně vysoké, aby se vybíjecí proud minimalizoval. Je však zde ještě jeden problém a to, že žádná (pasivní) součástka není ideální, ale ve skutečnosti tvoří RLC obvod s parazitními parametry, u rezistorů se jedná o sériovou indukčnost a paralelní kapacitu. Tyto parazitní parametry způsobují závislost impedance prvku na frekvenci kmitů, která by u ideálního rezistoru měla být nulová. U frekvencí v řádu 10^4 Hz se výrazně projevuje kapacita, kdežto vliv indukčnosti je zanedbatelný.



Obrázek 7: Kapacitně kompenzovaný dělič

Tento problém se v praxi řeší frekvenční kompenzací děliče paralelním připojením kondenzátorů k rezistorům. Rovnice s rezistory tak přejde na rovnici s komplexní impedancí.

Jednotlivé impedance

$$Z_1 = \frac{Z_{R1} \cdot Z_{C1}}{Z_{R1} + Z_{C1}} = \frac{\frac{R_1}{j\omega C_1}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = \frac{R_1}{j\omega C_1 R_1 + 1} \quad (1.27)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{R2} \cdot Z_{C2}}{Z_{R2} + Z_{C2}} = \frac{\frac{R_2}{j\omega C_2}}{R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{R_2}{j\omega C_2 R_2 + 1} \quad (1.28)$$

Po dosazení do vzorce pro napěťový dělič

$$k = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{R_2 \cdot (j\omega C_1 R_1)}{R_1 \cdot (j\omega C_2 R_2) + R_2 \cdot (j\omega C_1 R_1)} \quad (1.29)$$

Po porovnání pro 2 různé úhlové frekvence ω_1 a ω_2 a následném vyřešení rovnice vyjde poměr kapacit kompenzačních kondenzátorů

$$R_2 R_1^2 j\omega_1 C_1 - R_2 R_1^2 j\omega_2 C_1 = R_1 R_2^2 j\omega_1 C_1 - R_1 R_2^2 j\omega_2 C_1 \quad (1.30)$$

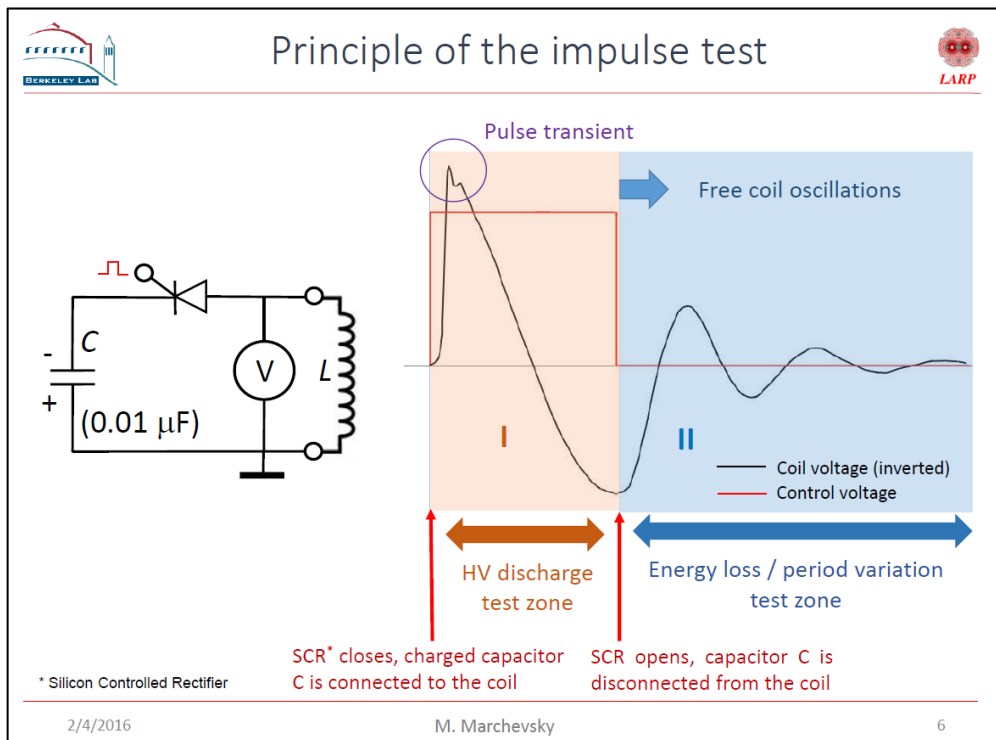
$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (1.31)$$

1.4 Impulsní testování cívek a elektromagnetů

Jedná se o metodu testování, při které se na svorky cívky přivede impuls napětí v řádu kilovoltů a poté se přesným voltmetrem s dostatečnou periodou vzorkování (např. osciloskopem) zobrazí impulsní charakteristika, ze které se vypočítávají jednotlivé kvalitativní parametry jako je indukčnost, parazitní odpory a kapacity. Jedná se o jedinou možnou metodu pro zjišťování síly izolace mezi jednotlivými závity a zkratů mezi závity a vodivým jádrem. Tyto parametry není možné měřit přímo střídavým proudem.

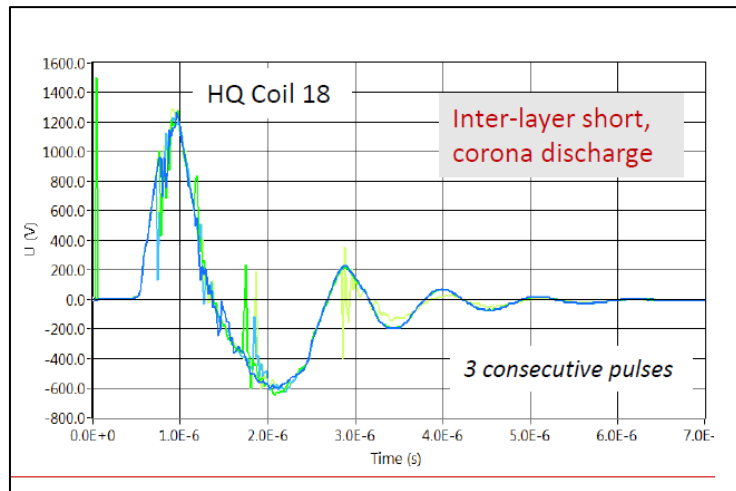
Měření probíhá takto: Nejprve se nabije kondenzátor C na napětí v řádu kilovoltů. Poté se pomocí signálu z řídicí jednotky sepne spínač, který uzavře paralelní LC obvod

mezi kondenzátorem a měřenou cívkou. Po chvíli (po uplynutí 1 periody) se opět spínač vypne a nyní se do rezonanční frekvence projevují pouze parazitní kapacity cívkou.




Obrázek 8: Princip impulsní metody[2]. Vlevo schéma, vpravo graf. V zakroužkované části je vidět chyba cívkou způsobená průrazem mezi závity.


Chyby izolace mezi závity samotnými a mezi vinutím a konstrukčními prvky jsou zjištěitelné podle přítomnosti náhlých vysokofrekvenčních šumových zákmitů a významných změn křivky. Přerušovaný zkrat mezi vinutím a jádrem se projevuje změnou rezonanční frekvence v průběhu přechodového děje vlivem změny parazitní kapacity izolace. Změna poklesu amplitudy vlny je způsobena ztrátami vířivými proudy, hysterezní smyčkou, odporem nebo korónovým výbojem. Změna vlastností přechodové charakteristiky se projevuje i například při připojení jádra na kladný nebo záporný pól měřicí elektrody.

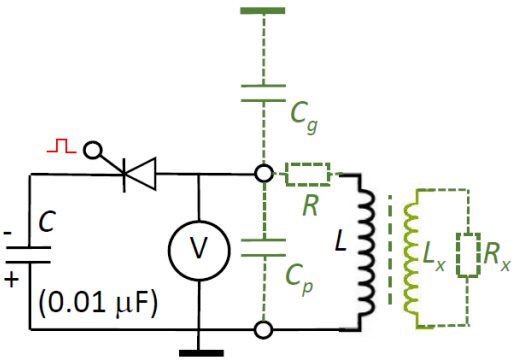


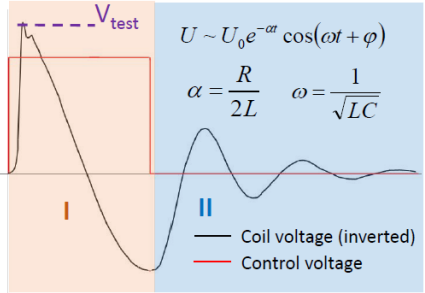
Obrázek 9: Příklad impulsní charakteristiky špatné cívky se zkraty mezi vrstvami vinutí.



Equivalent circuit







$U \sim U_0 e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi)$
 $\alpha = \frac{R}{2L} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

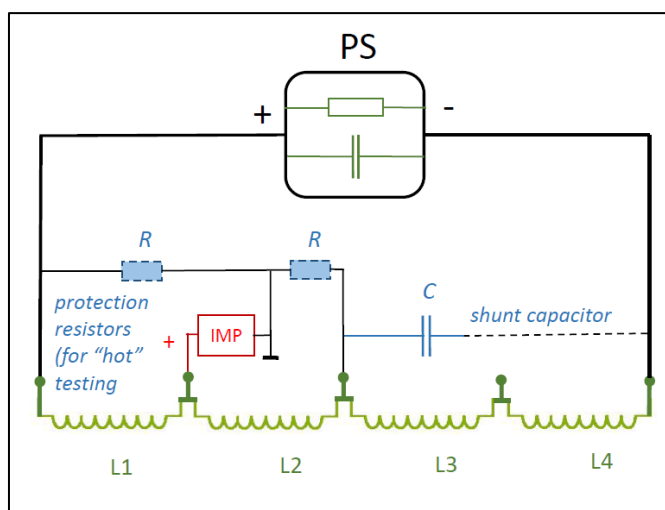
Once SCR closes, the capacitor charge $q = CU_0$ redistributes between C , C_p and C_g . Then: $U_{test} \sim U_0 C / (C + C_p + C_g)$

When setting a master waveform, the tester sequentially increases internal U_0 until U_{test} equals to the set test voltage.
 In case $C_p + C_g \gg C$ the required U_{test} may be not reachable.

2/4/2016
M. Marchevsky
7

Obrázek 10: Náhradní obvod reálné cívky. [2] Parametr C_p je kapacita mezi závity, C_g kapacita mezi cívkou a zemí, R odpor vinutí a L_x a R_x jsou ztráty způsobené vířivými proudy u střídavého proudu.

Některá měření dovolují testování elektromagnetů při připojení ke zdroji. Ostatní cívky v zařízení, které nejsou testovány, mohou vyžadovat připojení kompenzačního kondenzátoru, který potlačuje induktivní napěťovou špičku, co může poškodit napájecí zdroj. Také je vhodné použít ochranné rezistory, viz Obrázek 11.

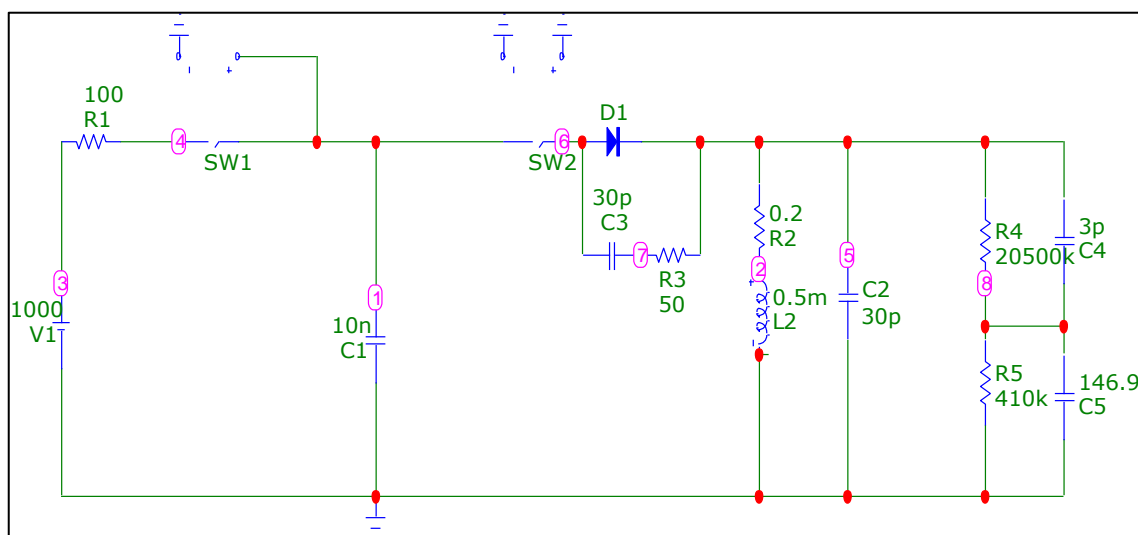


Obrázek 11: Testování vybraných cívek připojených ke zdroji.

Cívkou s vlastní rezonancí si lze představit jako otevřené přenosové vedení s kapacitami a indukčnostmi rozdělenými podle geometrie.

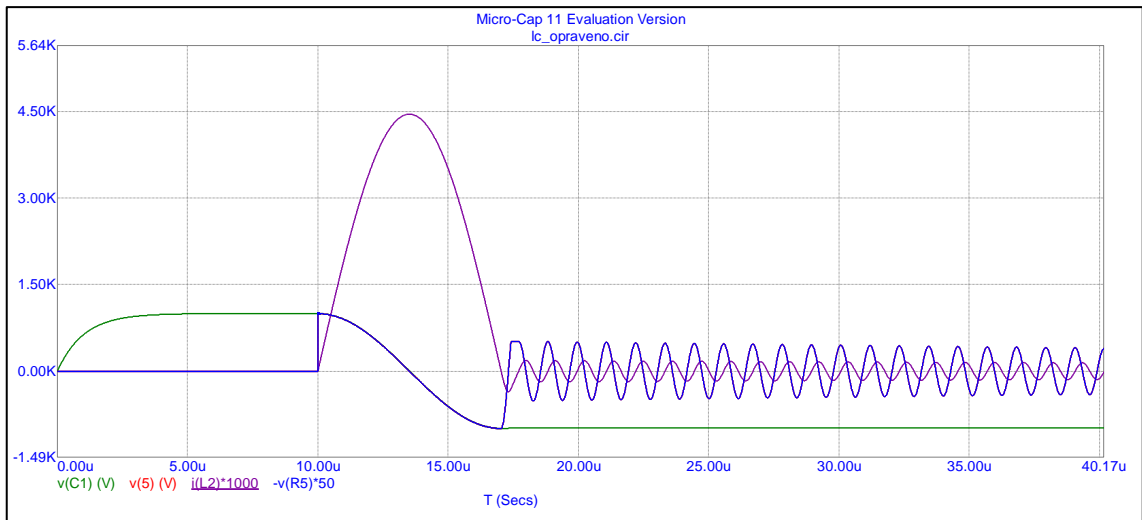
1.4.1 Simulace v prostředí Microcap

V simulačním softwaru Microcap bylo vytvořeno jednoduché simulační schéma obsahující zdroj stejnosměrného napětí (vystupujícího jako zvyšující měnič), hlavní kondenzátor $C1$ (10 nF). Spouštěcí tyristor je nahrazen součástkami $SW2$, $D1$, $C3$ a $R3$. Měřená cívka o indukčnosti 0,5 mH, sériovém odporu $0,2 \Omega$ a paralelní kapacitě 30 pF je reprezentována symboly $L2$, $R2$ a $C2$. Zbylé 4 součástky jsou součástí kapacitně kompenzovaného napěťového děliče pro měření na osciloskopu.



Obrázek 12: Schéma metody pro impulsní měření cívek

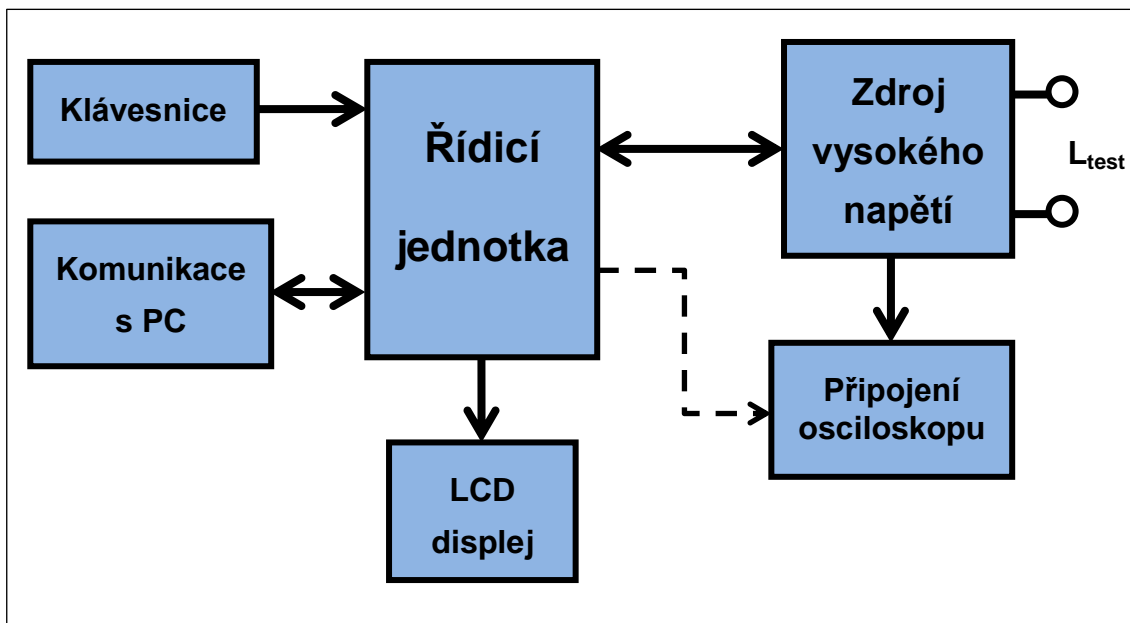
Na obrázku níže je vidět graf simulace metody, kde jsou zobrazeny napětí a proud cívkou. V okamžiku spuštění měření se objeví vysoký a dlouhý proudový zákmit a přebití soustavy na opačnou polaritu napětí. Po vypnutí tyristoru se také objevuje kmitání, ovšem o kratší periodě a nižší amplitudě.



Obrázek 13: Graf průběhu napětí na kondenzátoru (zeleně), na cívce (modře) a graf průběhu proudu cívkou v mA (fialově).

2 Praktická část

Cílem této diplomové práce je navrhnout a vytvořit prototyp impulsního testeru cívek. Z důvodu bezpečnosti muselo být maximální napětí na výstupním kondenzátoru o kapacitě 10 nF sníženo na 1000 V. Zařízení je napájeno ze síťového zdroje 12 V stejnosměrného napětí. Skládá se z řídicí jednotky Arduino, která ovládá pomocí pulsně-šířkové modulace řízený zdroj vysokého napětí. Zároveň je zpětně měřeno napětí na kondenzátoru, jehož hodnota je zobrazena na displeji. Hodnota výstupního napětí se zadává v rozmezí 20–1000 V pomocí klávesnice, která také ovládá nabíjení a vybíjení kondenzátoru. Zadaná hodnota se rovněž zobrazuje na LCD displeji. Při povelu k vybití kondenzátoru je rovněž vyslán signál pro osciloskop, aby začal měřit. Kromě ručního zadání je možno také ovládat přípravek z počítače pomocí USB.



Obrázek 14: Blokové schéma impulsního testeru

2.1 Návrh řízeného zdroje vysokého napětí

V kapitole 0 jsou popsány základní tři principy zvyšování napětí – transformátor, kondenzátorový násobič a indukční Step-up měnič. Pomocí jejich kombinace můžeme získat optimální DC-DC měnič.

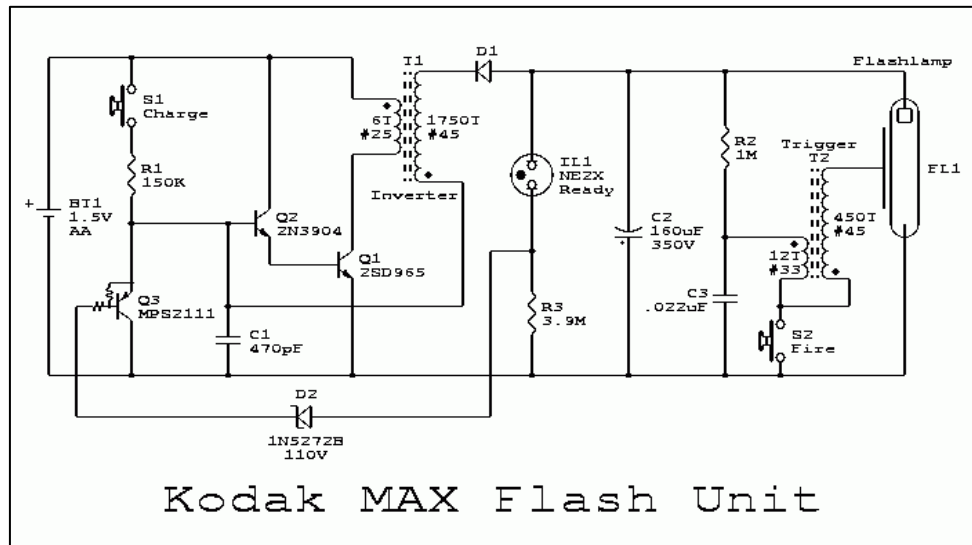
2.1.1 Rešerše

V této části jsou popsána zapojení zvyšujících měničů s obdobnými parametry používaných v jiných oblastech techniky.

2.1.1.1 Blesk fotoaparátu

Na stránkách p. Donalda Klipsteina[13] jsem našel schéma zapojení blesku fotoaparátu značky Kodak. Světelným zdrojem je xenonová výbojka, která je napájena napětím cca 300 V. Energie nabitého kondenzátoru je 4,5 J. Tato uložená energie může být i životu nebezpečná. Měnič blokovacího typu je napájen z tužkové baterie 1,5 V a jako zvyšující prvek je zde použit transformátor s poměrem 6/1750, který je ovládán

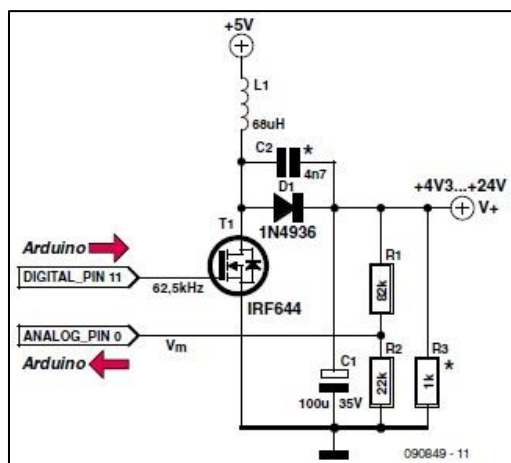
dvojicí tranzistorů v Darlingtonově zapojení. Nabití kondenzátoru je signalizováno svítící doutnavkou NE2X s předřadným rezistorem, paralelně k předřadnému rezistoru je zapojena báze tranzistoru, který zablokuje nabíjecí obvod. Na svorky kondenzátoru jsou připojeny elektrody výbojky. K zapálení elektrického oblouku slouží třetí elektroda, která je napájena druhým zvyšujícím transformátorem s poměrem 12/450, vysokonapěťový impuls je vyvolán stisknutím tlačítka „Fire“.



Obrázek 15: Schéma zapojení blesku značky Kodak.
 Autor: Donald Klipstein, zdroj: <http://donklipstein.com/kmaxhack.html>

2.1.1.2 Step-up měnič ovládaný Arduinem

Další zajímavé schéma, které má potenciál pro tento projekt, jsem našel na stránkách Circuit Cellar[14]. Jedná se o jednoduchý step-up měnič s výstupním napětím 4,3–24 V a indukční cívkou, jejíž proud je řízen MOSFET tranzistorem. Jeho řídicí elektroda je připojena k výstupu řídicí jednotky Arduino, tranzistor je otevírán a zavírán pomocí pulsně-šířkové modulace. Standardní přednastavená frekvence PWM je zhruba 500 Hz. Střídou budicího signálu PWM je regulováno napětí výstupní napětí měniče. Výstupní napětí je měřeno pomocí analogového vstupu připojeného na dělič napětí, hodnoty odporů $R1 = 82 \text{ k}\Omega$ a $R2 = 22 \text{ k}\Omega$ jsou určeny pro napětí maximálně 24 V, pro vyšší je nutno vyměnit za jiné hodnoty. Zátěž je reprezentována odporem $R3$, kondenzátor $C2$ slouží pro zlepšení účinnosti.

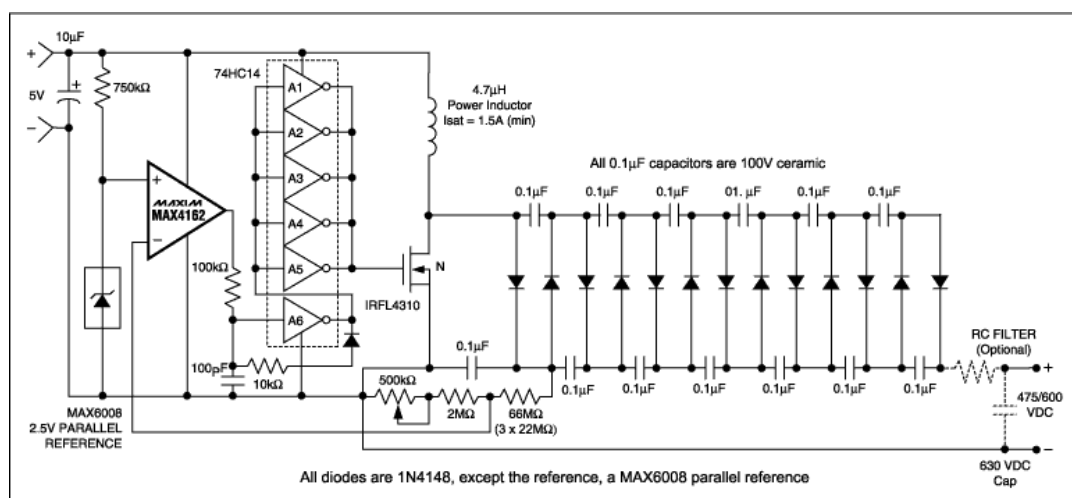


Obrázek 16: Schéma měniče řízeného výstupem z jednotky Arduino.

Autor: C. J. Abate, zdroj: <http://circuitcellar.com/ee-tips/arduino-based-diy-voltage-booster-ee-tip-117/>

2.1.1.3 Geigerův-Müllerův čítač

Měřicí část Geiger-Müllerova detektoru ionizačního záření (gama, beta nebo alfa) je tvořena trubicovou výbojkou s vláknem. Toto zařízení potřebuje pro svou činnost vysoké napětí v rozmezí 100–1000 V. Na stránkách Maxim Integrated[15] jsem našel schéma regulovatelného zdroje vysokého napětí. Tento měnič kombinuje induktivní Step-up s kondenzátorovým násobičem napětí. Řídicí obvod se skládá z klopného obvodu sestaveného z operačního zesilovače, na jehož neinvertující vstup je připojeno napájecí napětí a na invertující zpětná vazba od prvního kondenzátoru v násobiči, k němuž je paralelně připojen dělič napětí s reostatem, který reguluje velikost výstupního napětí měniče. Výstup operačního zesilovače je připojen na spínací MOSFET-N tranzistor nepřímo přes rychlý hradlový obvod se Schmittovými klopnými obvody, které obstarávají větší strmost sestupné hrany, která má zásadní vliv na velikost napětí indukovaného na cívce. Paralelně k tranzistoru je připojen 13-násobný násobič napětí, jež má mimo jiné za úkol odlehčit tranzistoru od vysokého napětí mezi Sourcem a Drainem. Na výstupu násobiče může být pasivní RC filtr typu dolní propust pro vyhlazení zvlnění.



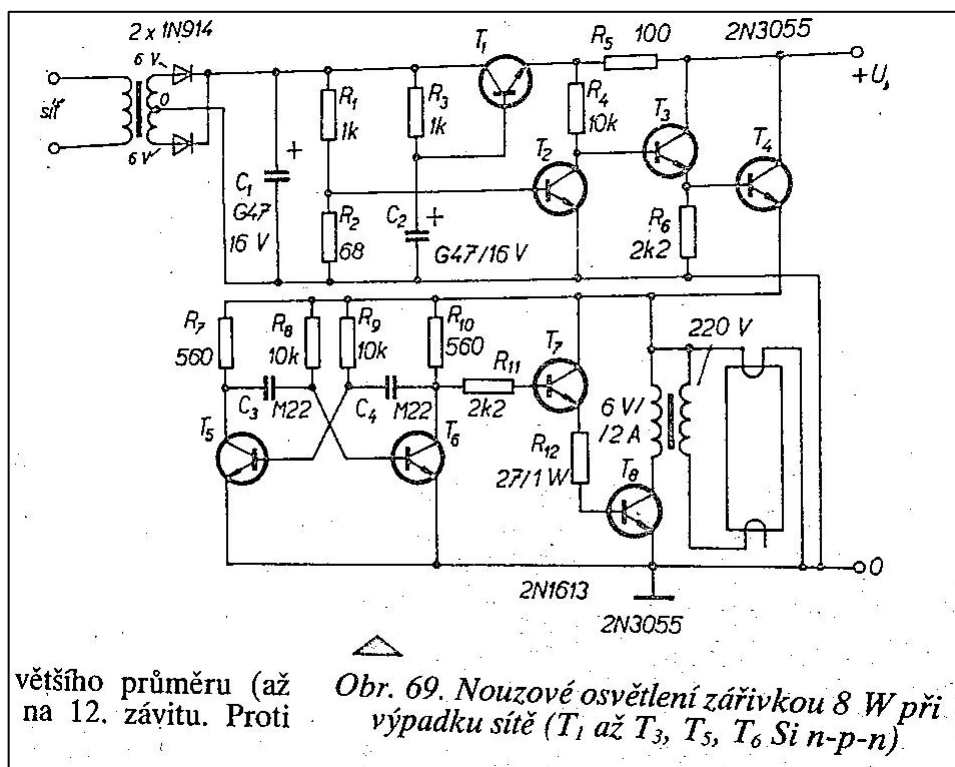
Obrázek 17: Zvyšující DC-DC měnič pro Geiger-Müllerovu trubicu.

Zdroj: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3757>

2.1.1.4 Nouzové osvětlení při výpadku proudu

Při výpadku proudu v institucích, jako jsou nemocnice nebo obchodní domy, je potřeba alespoň na několik minut zabezpečit evakuaci. Pro tyto účely slouží nouzová svítidla s bateriemi. Obvod se skládá z těchto částí: síťový transformátor, usměrňovač a stabilizátor, akumulátor, negující spínač, klopný obvod, zpětný transformátor na 220 V a samotná zářivka 8 W.

Na následujícím obrázku je zakresleno schéma zapojení. V klidovém stavu při dodávce proudu síťový zdroj 230 V/12 V dobíjí baterii pro uložení energie při výpadku a současně pomocí tranzistoru T_2 odklání proud ze spínacích tranzistorů T_3 a T_4 (Darlingtonovo zapojení). V okamžiku vypnutí přívodu síťového proudu sepne tranzistor T_4 , který nabudí z baterie klopný obvod tvořený tranzistory T_5 a T_6 a kondenzátory C_3 a C_4 . Výstup klopného obvodu je připojen na tranzistory T_7 a posléze T_8 , který střídavě spíná a rozpíná primární vinutí zvyšujícího napájecího transformátoru pro světelnou výbojku o příkonu 8 W. V podstatě se jedná o propustný měnič. Nominální hodnota výstupního napětí je udávána při zatížení, napětí transformátoru naprázdno je mnohem vyšší, takže dostačuje k zapálení výboje v zářivce.



Obrázek 18: Schéma zapojení zářivkového nouzového svítidla.

Zdroj: http://www.amapro.cz/datove_zdroje/ar/konstrukce_ar_1/ar1_291.php

2.1.2 Vlastní návrh

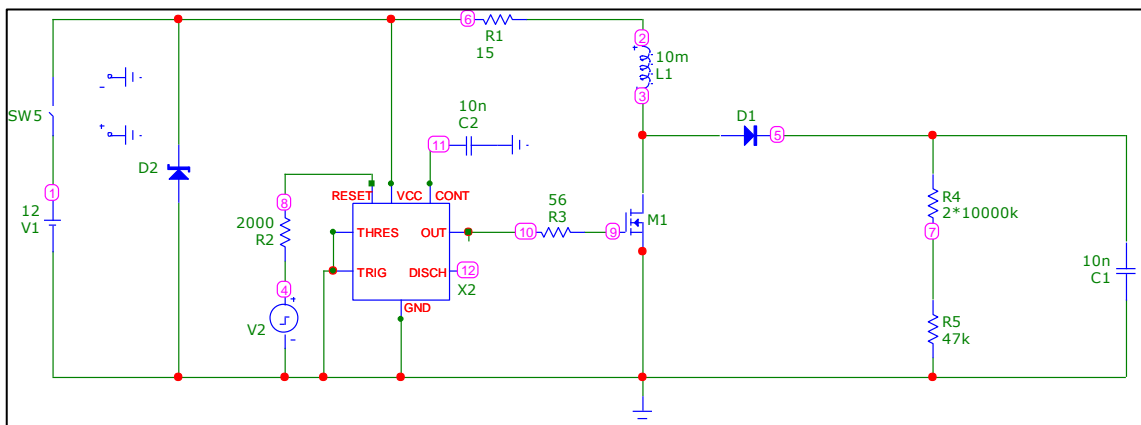
Kondenzátor o kapacitě 10 nF a nominální hodnotě maximálního napětí 1500 V je potřeba nabít na max. 1 kV. Energie na kondenzátoru je tedy:

$$E_C = \frac{1}{2} C U^2 = \frac{1}{2} \cdot 10^{-9+1+2 \cdot 3} = 5 \text{ mJ} . \quad (2.1)$$

Výkon měniče je závislý na čase nabíjení a účinnosti. Vzhledem k tomu, že zde dochází pouze k jednorázovému nabití kondenzátoru, není potřeba tolik dbát na výkon a účinnost.

2.1.2.1 Simulace

Vzhledem k tomu, že potřebujeme mít řízený zdroj napětí, je nejideálnější použít indukční Step-up měnič ovládaný střídou D pulsně šířkové modulace. Tranzistor MOSFET je ovládán pomocí budiče tvořeného známým obvodem NE555.[18] Pro generování vysokonapěťového pulsu tranzistor spíná a vypíná proud maximálně 250 mA.



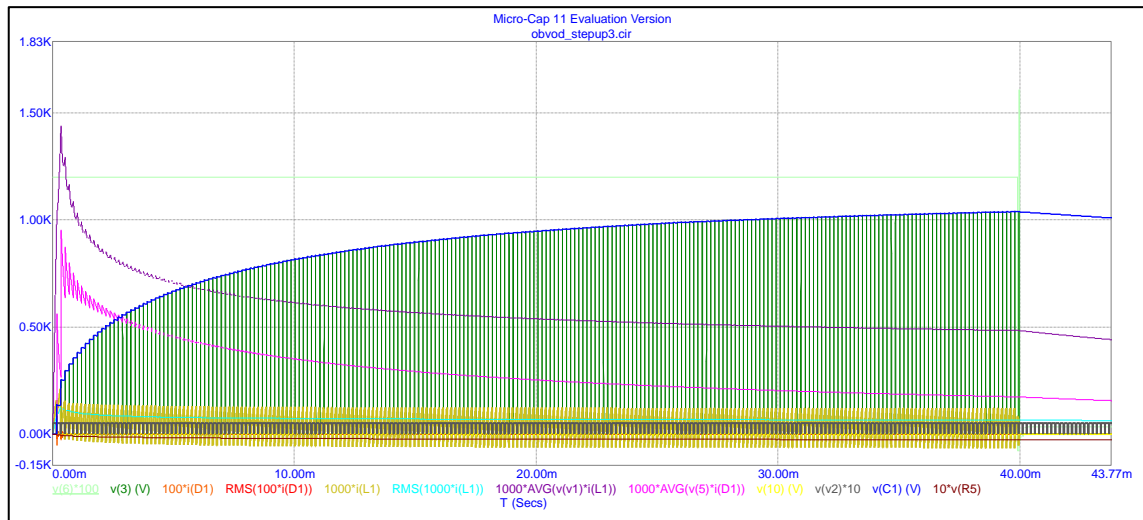
Obrázek 19: Schéma měniče v simulačním prostředí Microcap

Na obrázku výše je uvedeno schéma měniče v programu Microcap. Napěťový zdroj V1 je stejnosměrný napájecí zdroj 12 V. Zdroj V2 reprezentuje výstup jednotky Arduino o maximálním napětí 5 V. Protože unipolární tranzistory typu MOSFET potřebují k plnému otevření hradlové napětí minimálně 10 V, je nutno použít některý typ budiče. Protože v základní verzi softwaru není žádný z těchto obvodů dostupný, je zde použito náhradní schéma. Na stránkách Robodoupě.cz[18] bylo nalezeno schéma s časovačem NE555, který funguje jako neinvertující Schmittův klopný obvod. Kondenzátor C2 slouží k definování napěťové úrovně. Spínací tranzistor M1 musí být kvůli vysokonapěťovým špičkám dimenzován nejlépe na 1200 V (například STP6N120K3). Rezistor R3 o 56 Ω slouží k omezení proudu při vybíjení Millerovy kapacity spínacího tranzistoru, kvůli ochraně integrovaného obvodu.

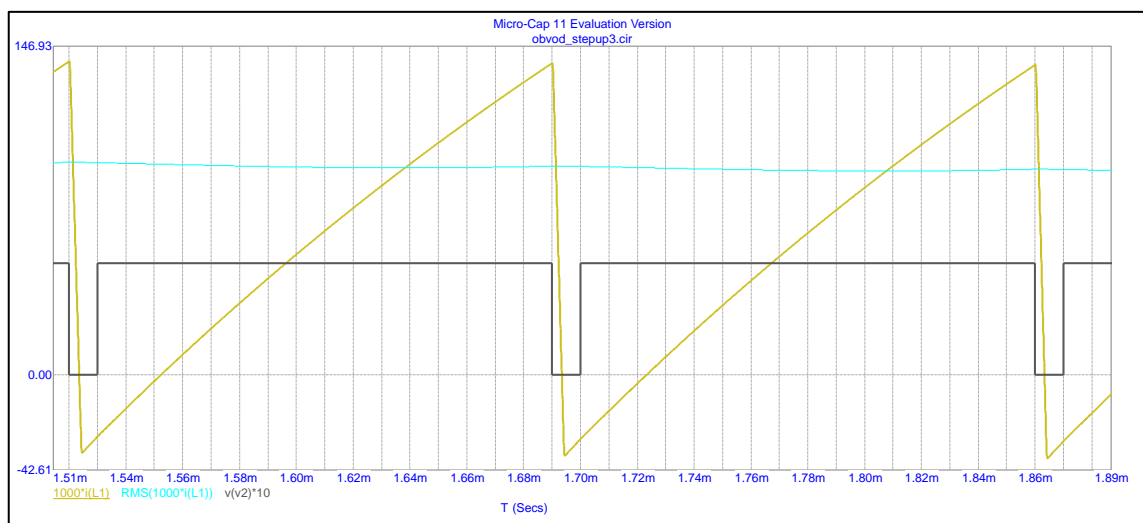
Rezistor R1 reprezentuje parazitního odpor cívky L1. D1 je usměrňovací vysokonapěťová dioda, která zamezuje zpětnému průniku proudu z nabíjeného kondenzátoru C1. Rezistory R4 a R5 tvoří napěťový dělič s převodem 47:100047 pro měření napětí na výstupu. Zenerova dioda D2 slouží jako přepěťová ochrana proti napěťovým špičkám při odpojení měniče od napájení, které by mohly poškodit elektronické součástky na primární straně.

Na dalším obrázku je vidět graf nabíjení kondenzátoru. Zelenou barvou je znázorněno napětí na spínacím tranzistoru. Modrá barva je průběh napětí na kondenzátoru C1. Žlutá je proud cívku L1 v mA a azurovou je znázorněno napětí na

primární straně vynásobené 100. Fialová je průměrný příkon a růžová průměrný výkon v mW. Je vidět, že napětí 1000 V je dosaženo zhruba po 30 milisekundách nabíjení. Po dovršení 40 ms je měnič odpojen od napájení a kondenzátor se pomalu vybíjí do napěťového děliče.



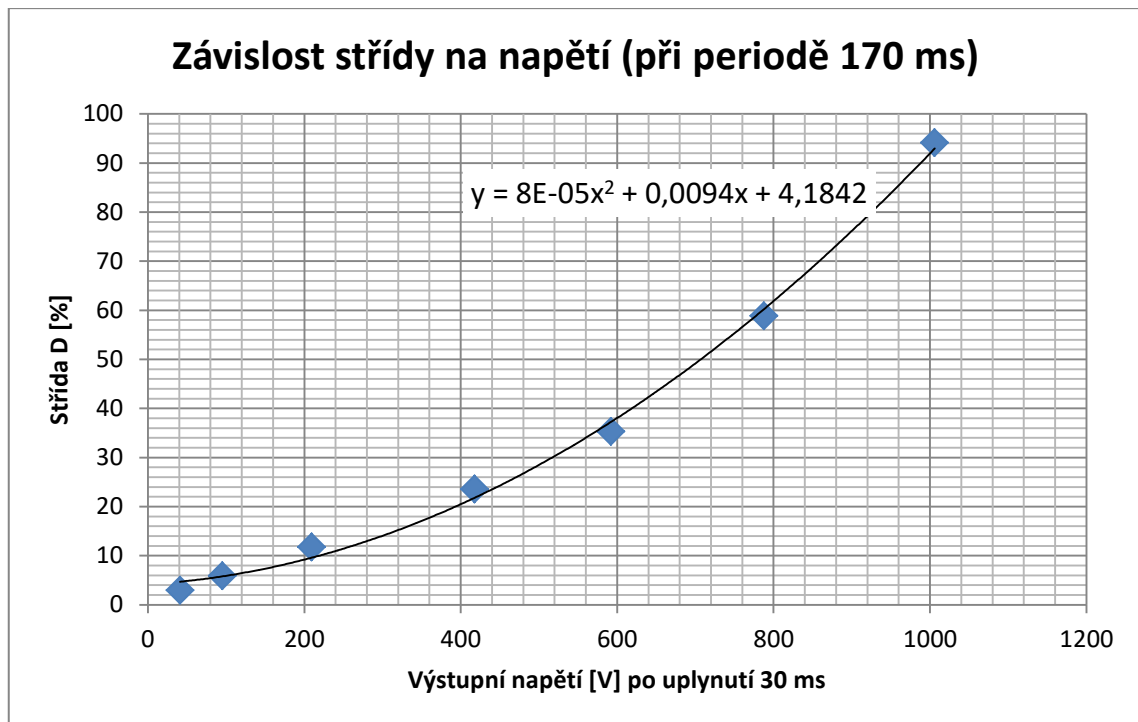
Obrázek 20: Graf nabíjení kondenzátoru C1



Obrázek 21: Detail spínání a nabíjení cívky. Šedou je desetinásobek napětí na výstupu Arduino ve V, žlutou je proud cívkou v mA. Azurová je efektivní hodnota proudu cívkou.

Na grafu níže je znázorněno, kolikaprocentní střihu je třeba nastavit, aby se po uplynutí 30 ms nabil kondenzátor na dané napětí. Měnič pracuje v nespojitém módu se spínacím kmitočtem 5882,35 Hz. Přibližně kvadratická závislost byla získána experimentálním měřením na výše uvedeném modelu a poté v programu Microsoft Excel aproximována polynomiální rovnicí druhého stupně.

Napětí bude řízeno kombinací spojitě regulace se zpětnou vazbou. Před každým vygenerováním pulsu dané délky bude porovnána žádaná a výstupní hodnota. Jakmile bude dosažena žádaná hodnota s předem danou přesností, bude měnič vypnut a automaticky spuštěno měření.



Obrázek 22: Závislost střídání a výstupního napětí při kmitočtu 5882,35 Hz.

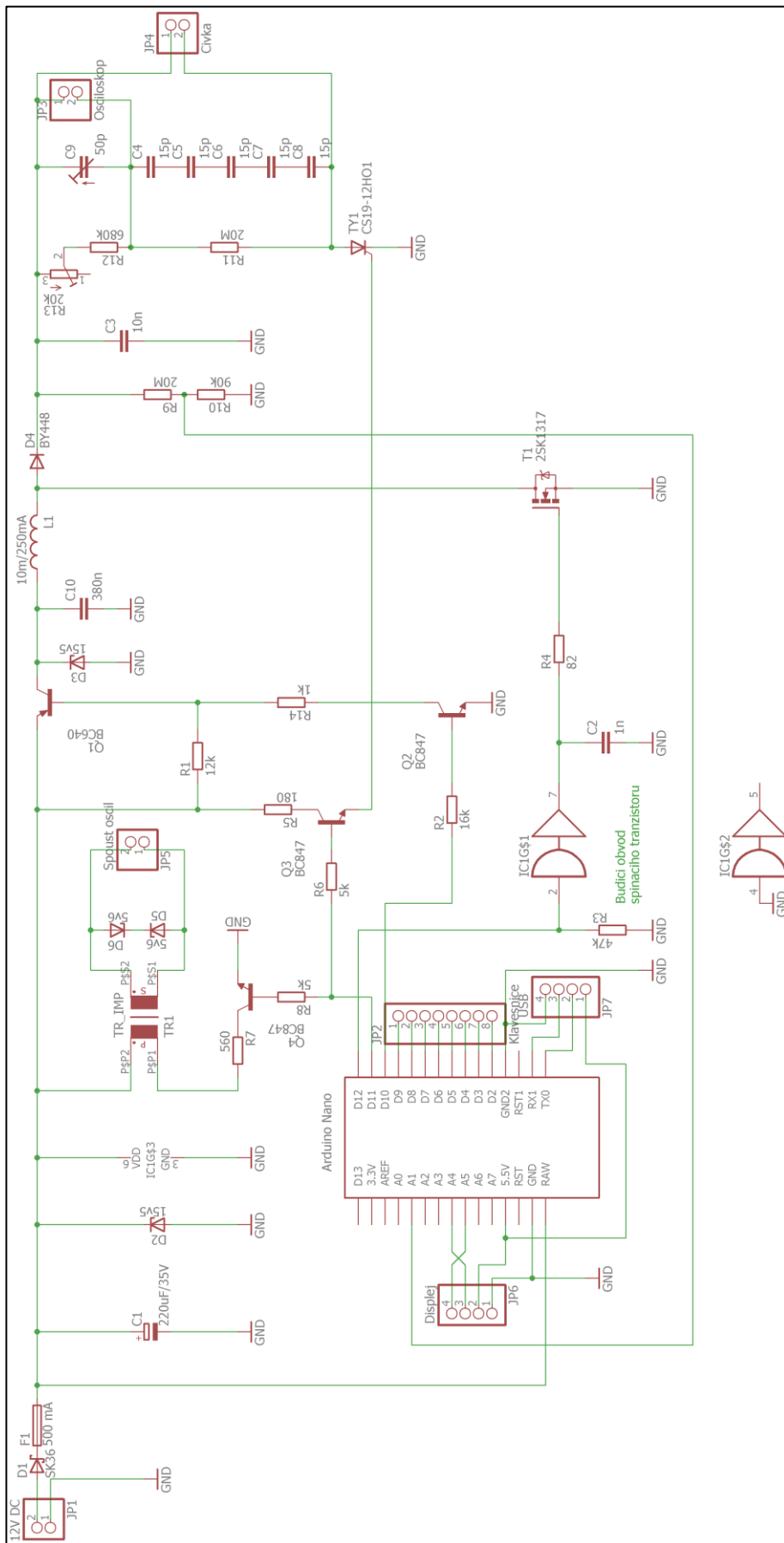
2.1.3 Schéma zapojení v návrhovém softwaru

Na obrázku níže je zobrazeno schéma zapojení zařízení v návrhovém programu Eagle. Přístroj je napájen ze spínaného síťového zdroje o napětí 12 V a výkonu 12 W, který je připojen konektorem zabudovaným ve stěně krabíčky. Za vstupem se nachází trubičková pojistka 500 mA, která ošetřuje potenciální zkrat, a Schottkyho dioda *D1* (typ SK36 – 60 V a 3 A), sloužící jako ochrana proti přepólování. Stability napětí je dosaženo elektrolytickým kondenzátorem s kapacitou 220 μ F. Zenerova dioda *D2* se závěrným napětím 15,5 V je přepět'ová ochrana. Řídící jednotka Arduino Nano je připojena k tomuto napětí pomocí napájecího vstupu *Vin*. Do schématu a následně i desky plošných spojů je vložena jako komplexní součástka, vedle níž jsou též pinové svorky pro připojení klávesnice, LCD displeje a převodníku RS232/USB. Poslední dvě jmenované mají napájení 5 V zajištěno pomocí napět'ového pinu 5.5 V.

Součástky *Q1*, *Q2*, *R1* a *R2* tvoří vypínač napájení pro zvyšující měnič. Tranzistor *Q2* je připojen k digitálnímu výstupu č. 10. Měnič je typu Step-Up a je tvořen induktorem *L1* (10 mH), diodou *D4* (typ BY448 – vysokonapět'ová) a vysokonapět'ovým spínacím MOSFET tranzistorem *T1* (2SK1317), který je buzen obvodem TC4427A (na schématu je znázorněn jako IC1Gs3 – napájení a IC1Gs1 a IC1Gs2 – funkční bloky). Jedná se neinvertující budič pro 2 tranzistory, jehož první vstup (pin 2) je připojen k digitálnímu výstupu Arduina č. 12. Vstupní hradlo pro druhý tranzistor je uzemněno, kvůli definici potenciálu – omezení spotřeby. Dále jako ochranné prvky pro potlačení napět'ové špičky při odpojení měniče od napájení jsou zde použity kondenzátor *C1* (10 nF) a Zenerova dioda *D3*.

Vysokonapětová část se nachází na schématu vpravo. Paralelně k hlavnímu kondenzátoru $C3$ je připojen snímací napětový dělič $R9$ a $R10$, který slouží jako zpětná vazba jdoucí do analogového vstupu č. 1. Měření je zahájeno přivedením proudového impulsu a svorky cívky. Obvod se uzavírá přes tyristor $TY1$ (typ CS19-12HO) s hradlem připojeným přes tranzistor $Q3$, který je ovšem nutno budít kontinuálně, neboť přídržný proud je vyšší, než maximální dosažitelný proud v RLC obvodu. Osciloskop se připojuje pomocí BNC konektoru ve stěně, vývody vedou na svorky $JP3$, které jsou z důvodu omezeného rozsahu vstupu osciloskopu připojeny přes kapacitně kompenzovaný odporový dělič s poměrem 1:50. Odporový trimr $R13$ slouží k doladění spodního odporu na 690 k Ω . Z důvodu nedostupnosti kondenzátoru 3 pF byla zvolena sériová kombinace pěti keramických kondenzátorů 15 pF/500 V. V dolní části děliče se nachází kapacitní trimr pro doladění paralelní kombinace kapacity přívodního kabelu a vstupu osciloskopu.

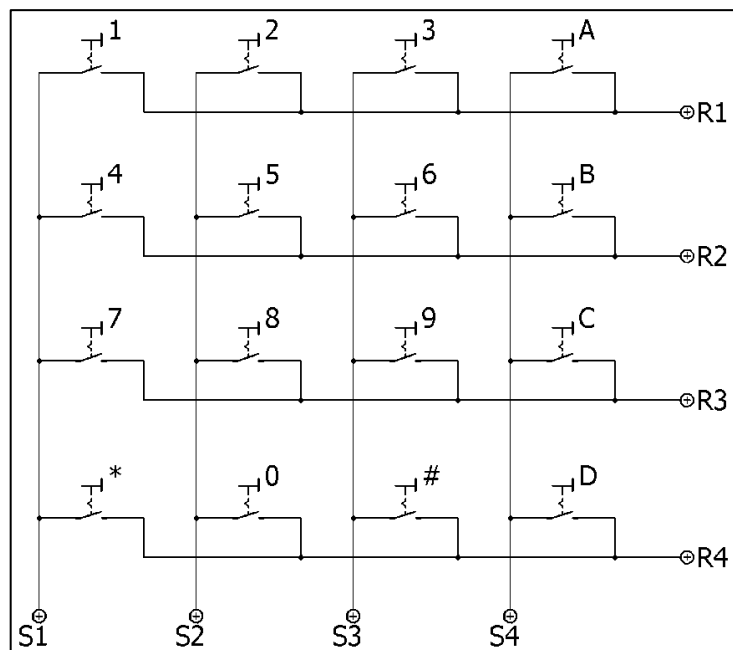
Zvláštní kapitolou je pak externí spoušť osciloskopu, která je provedena synchronně se sepnutím měřicího tyristoru. Kvůli shodnému potenciálu záporných svorek BNC konektorů na osciloskopu není možné přímé zapojení, je nutno použít galvanické oddělení. To je provedeno toroidním transformátorem $TR1$ s feritovým jádrem a počtem závitů 40:40 drátu průměru 0,4 mm s PVC izolací. Ten je připojen přes tranzistor $Q4$ a omezovací odpor $R7$ (560 Ω), takže proud tekoucí primárním vinutím je okolo 20 mA a výstupní napětový impuls cca 500 mV. Na sekundárním vinutí jsou dvě antisériově zapojené Zenerovy diody, ochrana proti přepětí.



Obrazek 23: Schéma zapojení měřícího zařízení v programu Eagle

2.1.3.1 Klávesnice

Pro místní obsluhu měřicího přípravku je využito membránové maticové klávesnice o 4 řádcích a 4 sloupcích. Její výhodou je snadnost použití a také instalace – ze spodní strany je samolepicí. Kontaktní odpor je $500\ \Omega$, izolační odpor $100\ M\Omega$ a doba odezvy 1 ms. K řídicí jednotce Arduino se připojuje pomocí 8pinového řadového konektoru, v němž jako první 4 piny slouží pro připojení sloupců a další 4 pro připojení řádků. Pořadí je sestupné – nejdříve 4. a jako poslední 1. sloupec resp. řádek. [19]



Obrázek 24: Schéma zapojení maticové klávesnice 4×4. Potenciály označené S1 – S4 jsou připojeny k pinům 4 – 1 (sestupně) a potenciály R1 – R4 k pinům 8 – 5.

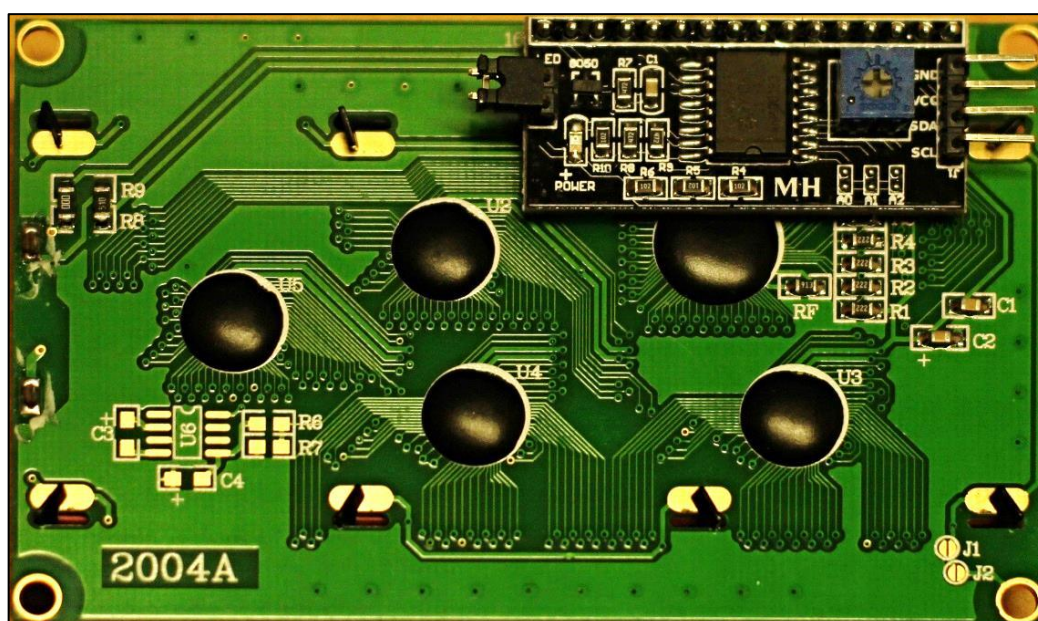
K obsluze v programu řídicí jednotky je použito knihovny Keypad.h. Klávesnice funguje tímto způsobem: Ve smyčce se posílají logické hodnoty na piny sloupců a zároveň se čtou hodnoty pinů řádků, a jejich kombinací se určí, které tlačítko bylo stisknuto. Piny sloupců tedy fungují jako výstupy a piny řádků jako vstupy. Nejdříve se pošle logická 1 na digitální výstup S1 a pokud je stisknuto např. tlačítko „1“, uzavře se obvod na digitální vstup R1 a do výstupní proměnné se uloží znak '1'. Po uplynutí nějaké doby se výstup S1 vrátí zpět do log. 0 a do logické 1 se přepne výstup S2 a čtení se opakuje, jen s jinou hodnotou sloupce. Poté dojde k přepnutí S2 na S3, S3 na S4 a nakonec S4 na S1 – celý cyklus se opakuje. V případě, že za celou periodu čtení nedojde ke stisku ani jedné klávesy, je hodnota výstupní proměnné -1. [19]

V samotném programu je nutno nejprve definovat matici znaků kláves. Poté jsou definovány vektory, které digitální výstupy odpovídají kterým sloupcům, resp. které digitální vstupy odpovídají příslušným řádkům. Poté dojde k inicializaci klávesnice a jejímu pojmenování (např. „klávesnice“). Ve smyčce je vyčtena hodnota klávesy pomocí funkce klávesnice.getKey() a uložena do znakové proměnné, která je dále vyhodnocena pomocí shody s nadefinovaným znakem.[19]

2.1.3.2 LCD zobrazovač

Pro zpětnou vazbu s uživatelem (zejména při lokálním ovládnání) je potřeba důležitá data a pokyny zobrazit na vhodném zařízení. Zde se nabízí osvědčený LCD zobrazovač.[20]

Jako nejvhodnější typ byl zvolen čtyřřádkový alfanumerický displej s řadičem HD44780, se žlutým podsvícením a sériovým rozhraním I2C. Produkt s číslem 1474620659 má již vestavěný převodník, takže pro komunikaci s jednotkou Arduino postačují pouze 2 vodiče – hodinový *SCL* (připojené do analogového vstupu A5) a datový *SDA* (analogový vstup A4). Komunikační plošný spoj na spodku modulu obsahuje také jumper, kterým se zapíná/vypíná LED podsvícení, a trimr sloužící k nastavení kontrastu displeje.



Obrázek 25: Spodní strana plošného spoje LCD displeje. V pravém horním rohu se nachází modul I2C s potenciometrem nastavujícím kontrast.

Samotný displej má čtyři řádky o 20 znacích. Komunikace je zabezpečena pomocí knihoven *Wire.h* (I2C rozhraní) a *LiquidCrystal_I2C.h* (pro displej). Ta obsahuje několik možných funkcí, například zahájení, zapnutí podsvícení, tisk, vymazání, poloha kurzoru, blikání kurzoru atd. Nejdříve je však nutno definovat adresu a počet znaků. Adresa je určena pevně, její hodnota je 0x27. V inicializační části programu se musí inicializovat i displej, a to funkcí „*init*“ nebo „*begin*“ (závisí na verzi knihovny). Samotné vypsání se provádí funkcí „*print*“. Celá tato procedura trvá v řádu desítek mikrosekund, což může zpomalovat fungování programu.

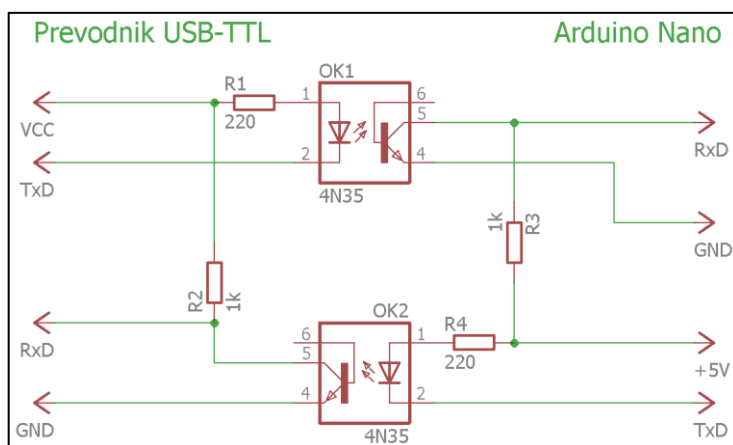
2.1.3.3 Komunikační rozhraní s PC

Kromě místní obsluhy pomocí vestavěné klávesnice bude možno ovládat zařízení také dálkově z počítače pomocí SCPI příkazů. To má opodstatnění zejména při automatizovaném měření z aplikace v MATLABu nebo .NET, při současné dálkové obsluze osciloskopu.

Přepnutí z režimu místní obsluhy do režimu dálkového ovládání je provedeno příjmem řetězce ve tvaru „*SYST:REM*“ (na velikosti jednotlivých písmen nezáleží) v klidovém stavu, kdy dojde k zablokování klávesnice (kromě písmene „A“) a zařízení je připraveno číst povely. Povel k nastavení hodnoty výstupního napětí, a poté spuštění měření, je ve tvaru „*VOLT x*“ (x je číselná hodnota v rozmezí 20–1000). K přepnutí obsluhy zpět na místní ovládání je nutno stisknout tlačítko „A“ na klávesnici přístroje.

Fyzická vrstva je vyřešena pomocí sériové asynchronní linky RS-232 (v tomto případě s úrovněmi TTL), kde 0 V je log. 0 a 5 V je log. 1. Jsou zde použity piny *RxD* a *TxD*, které jsou připojeny na převodník USB-UART, konkrétně typ TTL-232R-PCB od firmy FTDI. [22] Rychlost přenosu je nastavena na 9600 baudů.

Jelikož záporný pól konektoru osciloskopu (stínění BNC konektoru) je připojen na kladný pól zdroje vysokého napětí přípravku a země USB rozhraní na PC je připojena na zem procesoru a tedy na stejný potenciál (vodič PE v rozvodné síti TN-S), došlo by při přímém připojení komunikačního převodníku ke zkratování výstupu vysokonapěťového měniče a kondenzátor by tedy neměl šanci se nabít. Proto je zde nutno použít galvanické oddělení například pomocí optočlenů s dostatečným průrazným napětím. Použity zde byly 2 obvody 4N35, které mají nominální dielektrickou pevnost 5 kV.[23] Napájení na straně převodníku je z USB konektoru počítače, na straně Arduina napěťovým pinem +5V.[24]



Obrázek 26: Schéma zapojení opticky izolovaného komunikačního rozhraní.

Zařízení se k počítači připojuje pomocí kabelu s konektorem USB-B, jehož zdířka je instalována v boční straně krytu a je upevněna pájením na jednostranné cuprexitové desce s drážkami a instalačními otvory. Plošky jsou připojeny drátky k pinům původního USB konektoru na desce převodníku.

2.1.3.4 Povelý při dálkové obsluze

Zařizení má implementováno ovládání z počítače pomocí SCPI příkazů. Použity jsou tyto povelý:

- **idn?* – slouží k identifikaci zařízení. Lze přijmout v jakémkoliv stavu zařízení, následuje odpověď obsahující název zařízení, autora, číslo výrobku a datum poslední revize.
- **rst* – povel k resetu zařízení. Lze opět přijmout v jakémkoliv stavu, následuje zavolání funkce „*setup*“.
- *syst:rem* – zařízení přejde do stavu dálkového ovládání. Lze přijmout pouze v klidovém stavu při místní obsluze.
- *volt X* – zadání hodnoty napětí *X*, která musí být v rozmezí 20–1000 V. Po příjmu tohoto povelu dojde k nabití kondenzátoru na hodnotu napětí *X* a měření. Tento řetězec lze přijmout pouze v režimu dálkové obsluhy v klidovém stavu.

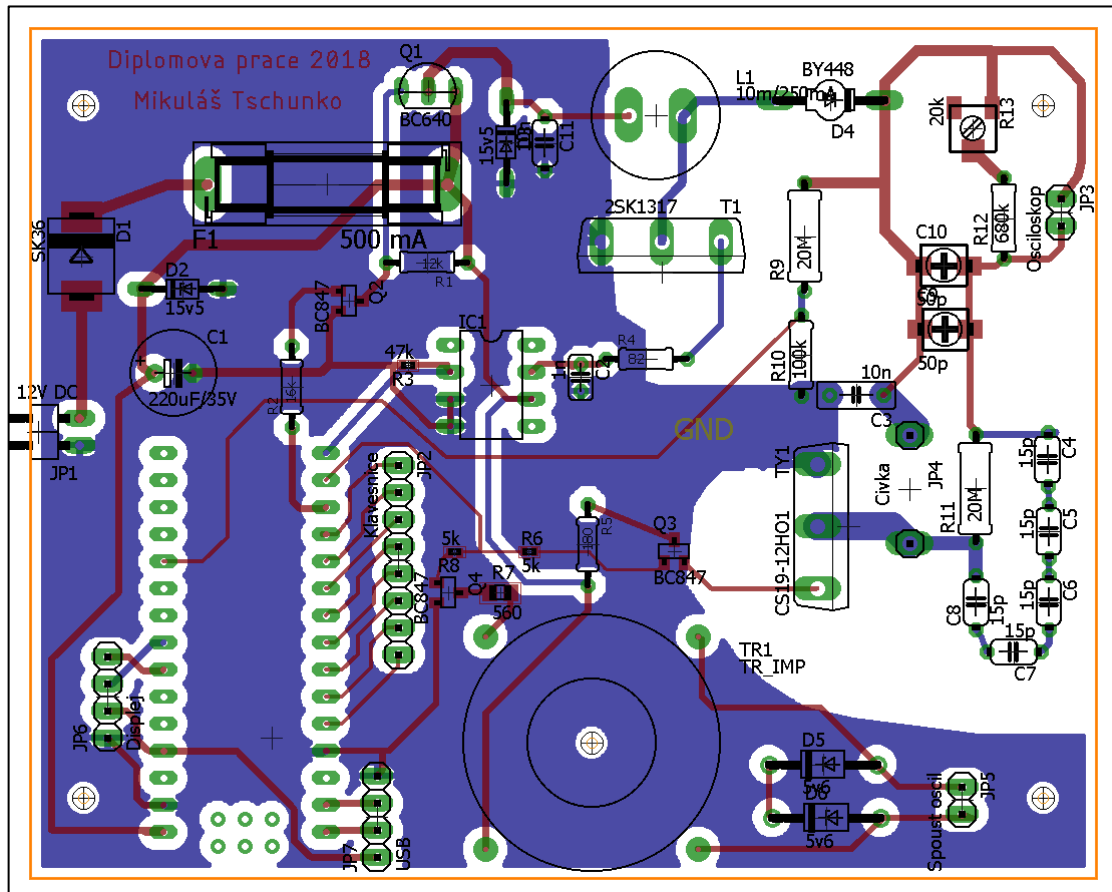
2.1.4 Deska plošných spojů

Bezplatná verze programu Eagle nabízí maximální velikost desky 8×10 cm. Tato velikost je použita i v tomto projektu s tím, že je počítáno i s polohou upevňovacích otvorů. Deska se musí vejít do krabičky, jejíž typ byl nalezen na [webových stránkách tme.eu](http://www.tme.eu). Ten má upevňovací body v horizontálním směru vzdáleny od sebe 65 mm (od pravého kraje 12,5 mm) a ve vertikálním směru 90 mm (10 mm od otvoru pro sešroubování horního a spodního dílu).

Samotná deska je oboustranná. V plošném spoji jsou použity jak otvorové (THT) součástky, tak součástky pro povrchovou montáž (SMD). Kromě vysokonapěťové části je ve spodní vrstvě použita rozlitá měď pro zemní potenciál. V části nalevo (na Obrázek 27) se nachází nízkonapěťová část, kde je pouzdro pojistky, ochranné diody, řídicí jednotka a menší tranzistory. Vedle řídicí jednotky jsou umístěny plochy pro připojení periférií. Napájecí konektor se nachází ve stěně krabičky mimo DPS, stejně jako měřicí konektory. V dolní části se nachází ručně navinutý impulsní transformátor pro externí spoušť osciloskopu. Ten je přišroubován středem do desky a vodiče vinutí připájeny přímo do desky. Nad ním, uprostřed je budicí integrovaný obvod pro hlavní tranzistor, a v horní části spínací PNP tranzistor pro měnič.

Vysokonapěťová část respektuje minimální izolační vzdálenost 6 mm (pro 1200 V) a není zde rozlitá měď. Stejně tak měřicí tyristor má přívodní elektrody záměrně roztažené do šířky (ve výkresu je použito pouzdro stejné jako tranzistor). Hlavní měřicí obvod (kondenzátor *C3*, svorky *JP4* pro cívku a tyristor *TY1*) má silné a krátké vodivé cesty, aby měl nízkou impedanci pro vysokofrekvenční puls. V horní části pro vysoké napětí se nachází induktor *L1*, spínací tranzistor *T1* a dioda *D4* zvyšujícího měniče. Měřicí dělič pro osciloskop, včetně kompenzačních kapacit, a připojovací místa pro konektory BNC se nacházejí úplně napravo.

Plošný spoj bude do krabičky nainstalován tak, aby napájecí svorky 12 V byly v dolní části krabičky (otočení o 90° proti směru hodinových ručiček) na pravé straně. Na horním dílu nad DPS bude nainstalována klávesnice. Displej a svorkovnice pro cívku budou na levé části víka krabičky. Komunikační převodník USB/TTL bude instalován v levé boční stěně krabičky.



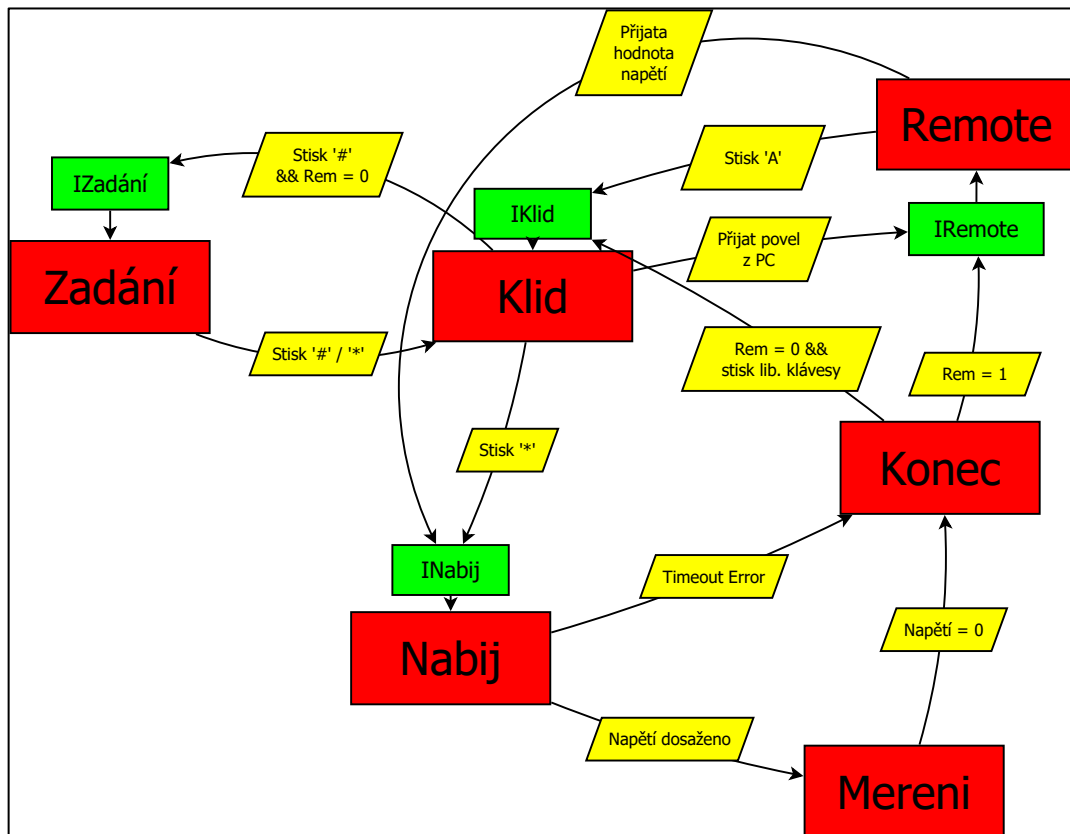
Obrázek 27: Svrchní i horní část navrhované desky plošných spojů v programu Eagle v původní variantě. Modrá barva značí cesty ve spodní vrstvě, červená v horní.

2.1.5 Program pro řídicí jednotku

Jako řídicí jednotka je použit vývojový kit Arduino Nano. Deska obsahuje 14 digitálních vstupů/výstupů, z nichž 6 může vysílat signál pulsně-šířkové modulační, 6 analogových vstupů (rozsah 0 – 5 V převádí na hodnoty 0 – 1024), 16 MHz krystal, komunikaci pomocí USB, piny pro napájení 5 V, 3,3 V a Vin, který obsahuje stabilizátor pro napětí v rozmezí 6 – 20 V. Analogové vstupy obsahují 10-bitové analogově-digitální převodníky, které se uvedou do činnosti funkcí „*analogRead()*“. Po celou dobu konverze (~100 μs) je vykonávání programu zmrazeno. Ke komunikaci s obsluhou slouží membránová maticová klávesnice 4×4 a LCD zobrazovač 20×4 znaků, připojený přes sběrnici I2C, takže stačí použít pouze 2 vodiče pro komunikaci.

Samotný program je koncipován jako jednoduchý stavový automat. Je zde celkem 6 základních stavů a mezi tím tzv. inicializační stavy, které slouží např. pro změnu textu na LCD displeji.

Ovládání je možno též přepnout do režimu vzdáleného přístupu. V případě, že po komunikační sběrnici přijde z PC signál pro zahájení komunikace, dojde k zablokování ovládání pomocí místní klávesnice a přechodu do režimu „Remote“. Stav nabíjení a měření nastává po detekci paketu s příslušnou hodnotou napětí na sběrnici. Po proběhnutí procesu je do PC vyslán signál o úspěšném provedení, příp. chybě. Přepnutí zpět do režimu místního ovládání je zabezpečeno pomocí stisku tlačítka „A“ na klávesnici, přičemž je do PC vyslán signál k ukončení komunikace a dojde k odblokování zbylých tlačítek klávesnice.



Obrázek 28: Stavový diagram programu. Červenou barvou jsou znázorněny hlavní stavy, zelenou barvou inicializační mezi-stavy (změna textu LCD). Žlutá barva označuje podmínky přechodů mezi stavy.

2.1.5.1 Definice symbolických konstant a maker

Pro snazší práci a přehlednost programu jsou některé číselné hodnoty pojmenovány slovně. Aby se ušetřilo místo v paměti, jsou použity pouze symbolické konstanty a makra pro překladač programu.

V prvním odstavci jsou pojmenována čísla 3 digitálních výstupů a analogového vstupu, měřícího výstupní napětí. Ve druhém odstavci jsou vyjádřeny ohmické hodnoty rezistorů zpětnovazebního napěťového děliče, hodnota tolerance výstupního napětí ve voltech a počet řádků a sloupců klávesnice. Makro „prevod“ slouží k vynásobení hodnoty analogového vstupu na hodnotu napětí kondenzátoru. Nakonec jsou definovány jednotlivé stavy (předpona „St“) a inicializační mezi-stavy (předpona „StI“). „Timeout“ je maximální počet průchodů stavem nabíjení, po jeho překročení dochází k chybě a přepnutí zpět do základního stavu.

```

#define tranzistor 12
#define tyristor 11
#define napajeni 10
#define analogUout 1
#define per 600
#define R1_ 20E+6
#define R2_ 90E+3
#define tol 3.0
#define prevod (5.0/1023.0*(R1_+R2_)/R2_)
#define radky 4
#define sloupce 4

#define StKlid 1
#define StZadani 2
#define StNabij 3
#define StMereni 4
#define StEnd 5
#define StRemote 6
#define StIKlid 11
#define StIZadani 12
#define StINabij 13
#define StIMereni 14
#define StIRemote 16

#define TimeOut 5000

```

Kód 1: Definice maker a symbolických konstant

2.1.5.2 Globální proměnné a periferie

Základem každého programu je přítomnost proměnných. Ty jsou deklarovány na začátku programu. 16bitová proměnná „ADC_“ je naměřená hodnota vstupního A/D převodníku, reálná proměnná „Uout“ je hodnota naměřeného napětí (vynásobeno převodem děliče). Proměnné „UoutSetpoint“ a „hodnota“ udávají velikost zadaného napětí na výstupu. 8bitová proměnná „stav“ slouží jako přepínač stavů zařízení. Znaková proměnná „klavesa“ ukládá hodnotu stisknutého tlačítka. Tři dvoustavové proměnné ošetřují náběžnou hranu tlačítek při různých stavech (*K* pro křížek, *H* jako hvězdička a *C* jako číslice). „CitacPruchodu“ zabraňuje zacyklení stavu nabíjení kondenzátoru, po dosažení hodnoty „TimeOut“ se cyklus přerušuje. Reálná proměnná „ton“ udává délky pulsu pro spínací tranzistor zvyšujícího měniče v μs . Nakonec do proměnné „retezec“ se ukládá hodnota bufferu komunikačního rozhraní.

Dále následuje definice periférií – dvouvodičově připojeného LCD displeje a 8vodičové klávesnice.

```

float Uout;
int ADC_;
int UoutSetpoint;
unsigned int hodnota;
byte stav = StIKlid;
char klavesa;
bool blokK = 0;
bool blokH = 0;
bool blokC = 0;
bool rem = 0;
unsigned int citacPruchodu = 0;
float ton = 0;
String retezec;

//nastavíme adresu a typ displeje
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // nastavení adresy (0x3F) je
důležité!!!

// vytvoření pole s rozmístěním kláves
char keys[radky][sloupce] = {
    {'1', '2', '3', 'A'},
    {'4', '5', '6', 'B'},
    {'7', '8', '9', 'C'},
    {'*', '0', '#', 'D'}
};
// nastavení čísel pinů pro spojení s klávesnicí
byte pinyRadku[radky] = {9, 8, 7, 6};
byte pinySloupce[sloupce] = {5, 4, 3, 2};

// vytvoření instance klávesnice z knihovny Keypad
Keypad klavesnice = Keypad( makeKeymap(keys), pinyRadku, pinySloupce,
radky, sloupce);

```

Kód 2: Deklarace globálních proměnných a definice periférií

2.1.5.3 Inicializace zařízení po připojení

Po připojení přístroje k napájecímu 12 voltovému zdroji nebo po restartu dojde k inicializaci hodnot proměnných. Následně dojde k definici digitálních výstupů je potřeba je nastavit na hodnotu 0. Také je spuštěna komunikace po sériové lince rychlostí 9600 baudů. Poté dojde k aktivaci LCD zobrazovače – funkce „*lcd.begin()*“ nebo „*lcd.init()*“ (záleží na verzi stažené knihovny pro LCD) a zapnutí podsvícení. Nakonec je na LCD vypsán uvítací nápis po dobu 3 s.

```

void setup() {
  UoutSetpoint = 100; //V
  stav = StIKlid;
  blokK = 0;
  blokH = 0;
  blokC = 0;
  rem = 0;
  citacPruchodu = 0;
  ton = 0;
  retezec = "*idn?";

  pinMode(tranzistor , OUTPUT);
  digitalWrite(tranzistor, LOW);
  pinMode(napajeni, OUTPUT);
  digitalWrite(napajeni, LOW);
  digitalWrite(tyristor, LOW);
  pinMode(tyristor, OUTPUT);

  // komunikace přes sériovou linku rychlostí 9600 baud
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(); // inicializace lcd
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor ( 0, 0 );
  lcd.print("Zdroj mereni civek");
  lcd.setCursor ( 0, 1 );
  lcd.print("Mikulas Tschunko");
  lcd.setCursor ( 0, 2 );
  lcd.print("Diplom. prace 2018");
  delay(3000);
}

```

Kód 3: Inicializace zařízení po připojení k napájení.



Obrázek 29: Pohled na zařízení s displejem při inicializaci.

2.1.5.4 Čtení sériové sběrnice

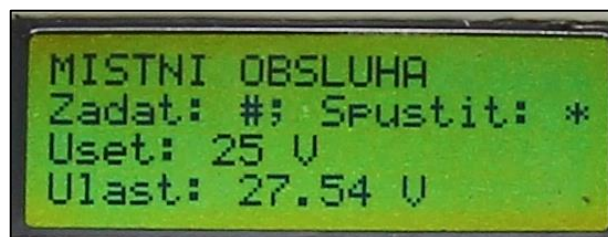
Na místě mimo přepínač stavů, na začátku smyčky programu, se nachází rutina pro čtení sériové komunikace. V případě, že se v bufferu nachází nějaká skupina znaků, je uložena do proměnné „retezec“ a poté jsou případná velká písmena převedena na malá. Dále jsou vyřešeny reakce na základní SCPI příkazy a dotazy z počítače. V případě příjmu řetězce „*idn?“ zařízení odpoví identifikačním řetězcem, kde je uveden autor, název zařízení, číslo přístroje a datum poslední revize. V případě příjmu „*rst“ dojde k restartu zařízení – zavolání funkce „setup()“.

```
if(Serial.available())
{
    retezec = Serial.readStringUntil(0x0A);
    if(retezec.length() >= 1) retezec.toLowerCase();
}
if(retezec.startsWith("*idn?"))
{
    Serial.println("Mikulas Tschunko - TUL; Zdroj pro impulsni mereni civek
(diplomova prace); Cislo 1; Revize: 13. 4. 2018");
    retezec = "";
}
else if(retezec.startsWith("*rst"))
{
    Serial.println("reset");
    retezec = "";
    setup();
}
```

Kód 4: Čtení sériové linky a reakce na univerzální podněty.

2.1.5.5 Stav Klid

V tomto stavu je zařízení v základním stavu pro místní obsluhu, pouze čeká na stisk klávesy. Pokud je stisknuta klávesa '#', přejde zařízení do stavu zadání hodnoty napětí. Pokud je stisknuta klávesa '*', začne nabíjení kondenzátoru (*StNabij*). Proměnné *blokK* a *blokH* slouží k detekci náběžné hrany tlačítek. Také je zde umožněno přepnutí do režimu dálkové obsluhy z PC – v případě příjmu řetězce „syst:rem“ dojde k přepnutí hodnoty dvoustavové proměnné „rem“ a současně je vyslán zpět potvrzovací řetězec.



Obrázek 30: Displej při stavu místní obsluhy


```

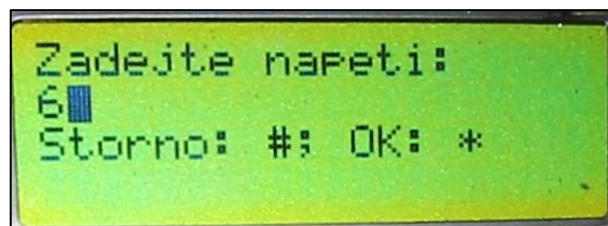
if (stav == StKlid)
{
    klavesa = klavesnice.getKey();
    if((klavesa == '#') && (!blokK)) blokK = 1;
    else if(blokK)
    {
        blokK = 0;
        hodnota = 0;
        stav = StIZadani;
    }
    else if((klavesa == '*') && (!blokH)) blokH = 1;
    else if(blokH)
    {
        blokH = 0;
        stav = StINabij;
    }
    if(retezec.startsWith("syst:rem"))
    {
        rem = 1;
        stav = StIRemote;
        Serial.println("syst:rem");
        retezec = "";
    }
}
}

```

Kód 5: Úsek programu pro klidový stav – režim místní obsluhy.

2.1.5.6 Stav Zadání

V tomto stavu, který je přístupný pouze při místní obsluze, je pomocí klávesnice zadávána do proměnné „*hodnota*“ napětí na kondenzátoru v rozmezí 20–1000 V. Před uvedením zařízení do tohoto stavu je na displeji spuštěno blikání kurzoru (funkce „*lcd.blink()*“). Z tohoto stavu se dá vrátit zpět do klidového, buďto beze změny hodnoty (klávesa '#') nebo se uloží nová hodnota do proměnné *UoutSetpoint* (při stisku '*'). Je zde booleovská proměnná *blokC*, která slouží jako ošetření náběžné hrany tlačítka pro číslici.



Obrázek 31: Stav displeje při zadání z klávesnice s blikajícím kurzorem.

```

else if(stav == StZadani)
{
    klavesa = klavesnice.getKey();
    if((klavesa >= '0') && (klavesa <= '9') && !blokC)
    {
        blokC = 1;
        hodnota = hodnota*10.0 + klavesa - '0';
        lcd.print(klavesa);
    }

    else if((klavesa == '*') && !blokH)
    {
        if(hodnota <= 20) hodnota = 20;
        else if(hodnota >= 1000) hodnota = 1000;
        blokH = 1;
        UoutSetpoint = hodnota;
    }
    else if((klavesa == '#') && !blokK) blokK = 1;
    else if(!klavesa)
    {
        blokC = 0;
        if(blokK || blokH)
        {
            blokK = 0;
            blokH = 0;
            stav = StIKlid;
        }
    }
}

```

Kód 6: Úsek programu pro stav zadání hodnoty výstupního napětí

2.1.5.7 Stav Nabij

Do tohoto stavu se lze dostat z klidového stavu po stisknutí hvězdičky nebo, v případě dálkového ovládání, po příjmu příkazu s hodnotou napětí. Dochází zde k ovládání budiče MOSFET tranzistoru zvyšujícího Step-Up měniče. Ten pracuje v nespojitém módu. Řízení je kombinací spojitě a dvoustavové regulace – porovnává se hodnota naměřená na analogovém vstupu se zadanou hodnotou *UoutSetpoint*. Je zde také omezení doby nabíjení – v případě, že dojde k více než 5000 průchodům, dochází k *Timeout* chybě.

V tomto stavu probíhá nabíjecí rutina ve *for* cyklu, z toho důvodu, že pokud by program projížděl celou smyčku, došlo by k protažení doby vypnutí hlavního tranzistoru, což by mělo za následek pokles napětí. Nejdříve dojde k výpočtu potřebné délky zapnutí spínacího tranzistoru. V případě, že je hodnota napětí na kondenzátoru menší, než zadaná, a zároveň nedošlo k *Timeoutu*, připojí se zvyšující měnič ke zdroji napětí (digitální výstup „zap“) a poté dojde k vygenerování pulsu o délce „ton“ pomocí digitálního výstupu „tranzistor“. V případě, že napětí přesáhne zadanou hodnotu, měnič nedělá nic a jen čeká, dokud napětí nepoklesne vlivem vybíjecího proudu napěťového děliče. V případě, že absolutní hodnota rozdílu napětí na analogovém vstupu a zadaného napětí je menší nebo rovna určité toleranci (symbolická konstanta „tol“ = 3 V), dojde k odpojení měniče od napájení, vyskočení z *for* cyklu a přechodu do stavu vybíjení. V případě, že nabíjení trvá déle, než stanovenou dobu (proběhne celý *for* cyklus), převede zařízení do stavu *Konec* a výpisu, že došlo k chybě.

```

if (stav == StNabij)
{
    ton = (0.0001 * UoutSetpoint * UoutSetpoint + 0.016 * UoutSetpoint +
4.1131) * 1.8;
    for (citacPruchodu = 0; citacPruchodu < TimeOut; citacPruchodu++)
    {
        ADC_ = analogRead(analogUout);
        Uout = ADC_ * prevod;

        if (citacPruchodu % 250 == 0) {
            lcd.setCursor ( 0, 2 );
            lcd.print(Uout);
            lcd.print(" V, ");
            lcd.print(ADC);
            lcd.print(" ");
            lcd.setCursor ( 0, 3 );
            lcd.print(ton);
            lcd.print(" ");
        }
        if (abs(Uout - UoutSetpoint) <= tol)
        {
            digitalWrite(napajeni, LOW);
            digitalWrite(tranzistor, LOW);
            stav = StMereni;
            break;
        }
        else if ((Uout < UoutSetpoint) && (citacPruchodu < TimeOut))
        {
            digitalWrite(napajeni, HIGH);
            digitalWrite(tranzistor, HIGH);
            delayMicroseconds(ton);
            digitalWrite(tranzistor, LOW);
            delayMicroseconds(10); //t_off
        }
    }

    if (citacPruchodu >= TimeOut)
    {
        lcd.setCursor ( 0, 0 );
        lcd.print("Timeout Error");
        lcd.setCursor ( 0, 1 );
        lcd.print(Uout);
        lcd.print(" V");
        lcd.setCursor ( 0, 2 );
        lcd.print("OK: #      ");
        if (rem == 1) Serial.println("Timeout Error");
        stav = StEnd;
        citacPruchodu = 0;
        digitalWrite(napajeni, LOW);
    }
}
}

```

Kód 7: Úsek programu pro stav nabíjení kondenzátoru

2.1.5.8 Stav Měření

Jakmile je hodnota napětí na kondenzátoru na zadané hodnotě s určitou tolerancí, dochází ihned k sepnutí hradla tyristoru, který uvolní energii z kondenzátoru do měřené cívky připojené na výstupních svorkách. Protože proud tekoucí tyristorem je menší, než je přídržný proud tyristoru, je potřeba mít hradlo připojeno po dobu, dokud napětí na kondenzátoru neklesne k nule. Pro zrychlení operace zde není hodnota analogového vstupu násobena převodem. Je zde použita smyčka o 1000 průchodech, pokud napětí klesne dříve, dojde k vyskočení. Poté přejde zařízení do koncového stavu.

Paralelně k hradlu tyristoru je připojen přes tranzistor a rezistor oddělovací toroidní transformátor, který slouží k vyslání spouštěcího impulsu do osciloskopu (vstup *External Trigger*).

```
if(stav == StMereni)
{
    digitalWrite(tyristor,HIGH);
    for(byte i = 0; i < 1000; i++)
    {
        ADC_ = analogRead(analogUout);
        if(ADC_ <= 10) break;
    }

    digitalWrite(tyristor,LOW);

    lcd.setCursor ( 0, 0 );
    lcd.print("Napeti dosazeno");
    lcd.setCursor ( 0, 1 );
    lcd.print(Uout);
    lcd.print(" V");
    lcd.setCursor ( 0, 2 );
    lcd.print("OK: klav      ");
    citacPruchodu = 0;
    stav = StEnd;
}
```

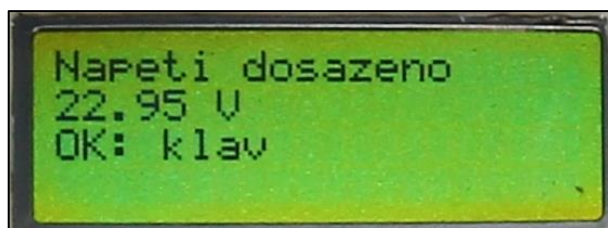
Kód 8: Úsek programu pro stav vybíjení kondenzátoru – měření

2.1.5.9 Stav Konec

Po skončení měření nebo po chybě *Timeout* přejde zařízení do koncového stavu. V případě, že zařízení je v režimu místní obsluhy (*rem* = 0), tak kdy čeká na stisk libovolné klávesy, který vrátí zařízení do klidového stavu. Ovšem v případě obsluhy dálkové dojde k odeslání potvrzovací zprávy s hodnotou napětí na výstupu po sériové lince a k okamžitému přechodu do klidového stavu.

```
if(stav == StEnd)
{
    if(rem == 1)
    {
        stav = StIRemote;
        Serial.print("OK. Uout:");
        Serial.print(Uout);
        Serial.println(" V");
    }
    else
    {
        klavesa = klavesnice.getKey();
        if((klavesa) && (!blokK)) blokK = 1;
        else if(blokK)
        {
            blokK = 0;
            hodnota = 0;
            stav = StIKlid;
        }
    }
}
```

Kód 9: Úsek programu pro stav konce měření



Obrázek 32: Stav displeje po skončení měření.

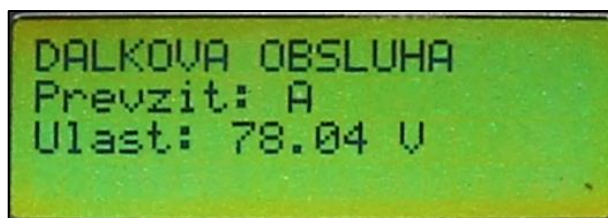
2.1.5.10 Stav dálkové obsluhy

V případě, že je zařízení v režimu dálkové obsluhy z PC, má základní stav zařízení jméno *StRemote*. V tomto stavu zařízení kontroluje, zdali nedostalo povel z počítače k započetí měření. Ten má tvar „*VOLT*“ + hodnota napětí ve voltech. Řetězec je rozdělen na 2 části. Druhá část, počínaje 6. znakem, je převedena na celočíselnou hodnotu napětí, která musí být v rozmezí 20 až 1000 voltů. Poté je zařízení přepnuto do stavu nabíjení.

Současně je čtena hodnota z klávesnice a v případě, že byla stisknuta klávesa „A“, dojde k převzetí obsluhy na místní režim a tato skutečnost je oznámena počítači.

```
if(stav == StRemote)
{
    klavesa = klavesnice.getKey();
    if(retezec.startsWith("volt "))
    {
        String pom2 = retezec.substring(5);
        hodnota = pom2.toInt();
        if(hodnota <= 20) hodnota = 20;
        else if(hodnota >= 1000) hodnota = 1000;
        UoutSetpoint = hodnota;
        stav = StINabij;
        retezec = "";
    }
}
if(klavesa == 'A')
{
    Serial.println("SYST:LOC");
    rem = 0;
    stav = StIKlid;
}
}
```

Kód 10: Úsek programu pro klidový stav při režimu dálkové obsluhy



Obrázek 33: Stav displeje při dálkovém ovládní.

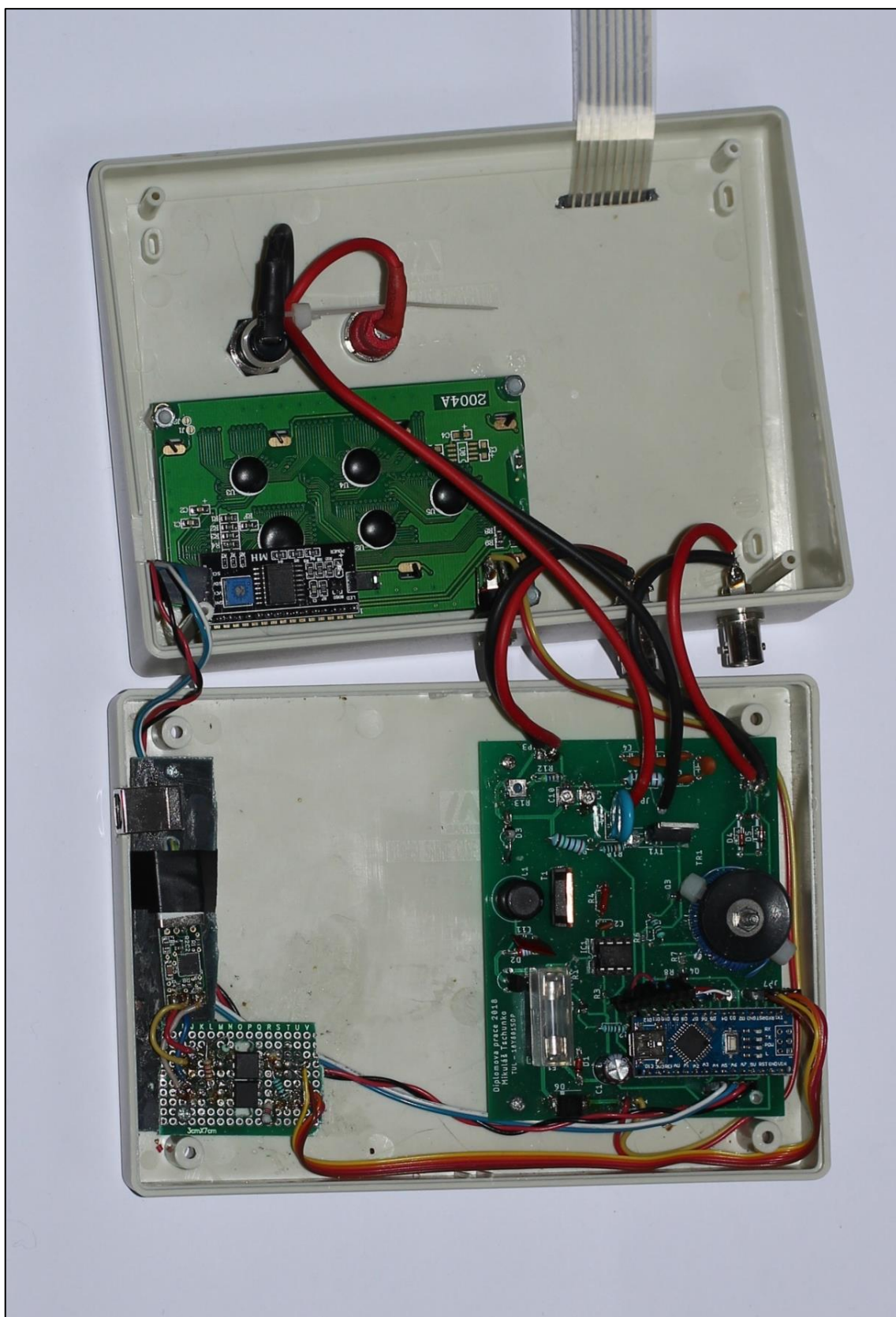
2.2 Zhotovení výrobku

Desky plošných spojů, displej, konektory a další komponenty byly nainstalovány do polystyrénové krabičky typu CP-18-34 firmy CombiPlast, zkosené na šířku. Barva je šedá, rozměry jsou: šířka 188, délka 133 mm a zadní a přední výška 56,5 mm resp. 32,5 mm. Ve spodní části krytu se nachází celkem 6 distančních s otvory pro instalaci desky.

Na Obrázek 34 je fotografie otevřeného krytu zařízení. Do vrchní části (víka) musel být vyříznut obdélníkový otvor pro LCD zobrazovač a šterbina pro vodiče klávesnice s konektorem. Poté byly v zadní části vyvrtány kruhové otvory pro napájecí konektor 5,5 mm a BNC konektory pro osciloskop.

V dolní části byl do otvorů v pravé části instalován hlavní plošný spoj. Hlavním problémem zde je připojení klávesnice, jejíž kabel se musí před odklopením víka odpojit od pinového konektoru, který je připájen na drátech z plošného spoje (kvůli omezení ohybu fólie). Na levé straně se nachází komunikační rozhraní s USB-B zdírkou, pro niž byl na levé zadní straně vyříznut otvor.

Vzhledem k určitému vývoji prototypu a časové tísni nebylo možno použít leptanou desku plošných spojů u komunikátoru s PC. Proto zde bylo použito provizorní řešení v podobě jednostranné cuprexitové desky, do níž byly vyříznuty izolační drážky a vyvrtány otvory pro USB-B zdířku. Ta byla poté připojena drátky k převodníku na UART, který byl připevněn lepicí páskou ke svrchní (holé) straně. Optický izolátor byl pro změnu vyřešen pomocí univerzálního oboustranného plošného spoje s pájecími body, u něhož byla v místě instalace optočlenů uměle zvětšena izolační vzdálenost pomocí vyfrézování drážky přes celou tloušťku desky (odebrání sloupce s písmeny *O* a *P*).



Obrázek 34: Osazení zařízení v pultové krabičce. V horní části obrázku je odklopené víko s displejem, klávesnicí, konektory a svorkami pro cívku. V dolní části se nachází deska plošných spojů (vpravo) se svorkami pro připojení pinů klávesnice a komunikační rozhraní (vlevo).

2.3 Oživení výrobku

Hlavním problémem při ožívání byly kalibrace obou odporových děličů. U zpětnovazebního děliče pro analogový vstup jednotky Arduino musel být snížen spodní rezistor ze 100 k Ω na 90 k Ω paralelním zařazením rezistoru 1 M Ω , z důvodu napěťové rezervy (rozsah analogového vstupu je 0–5 V). Vedle toho u snímacího napěťového děliče byl problém s tím, že na osciloskop v případě nastavení poměru 1:50 ukazoval zhruba poloviční napětí, než by mělo být podle vypočítaného poměru, ačkoliv součástky byly navrženy správně. Důvod je neznámý, a tak je potřeba nastavit na osciloskopu sondu 1:1 a vektor naměřených dat vynásobit konstantou $k = 25$.

Mezi kolektorem pomocného tranzistoru Q2 a bází napájecího Q1 musel být zařazen rezistor 1 k Ω , neboť v případě dlouhého sepnutí šel proud do zkratu, což mělo za následek zničení SMD tranzistoru Q2 teplem. Z důvodu úspory součástek byl odebrán kapacitní trimr C11, neboť nebyl potřebný, viz Obrázek 23)



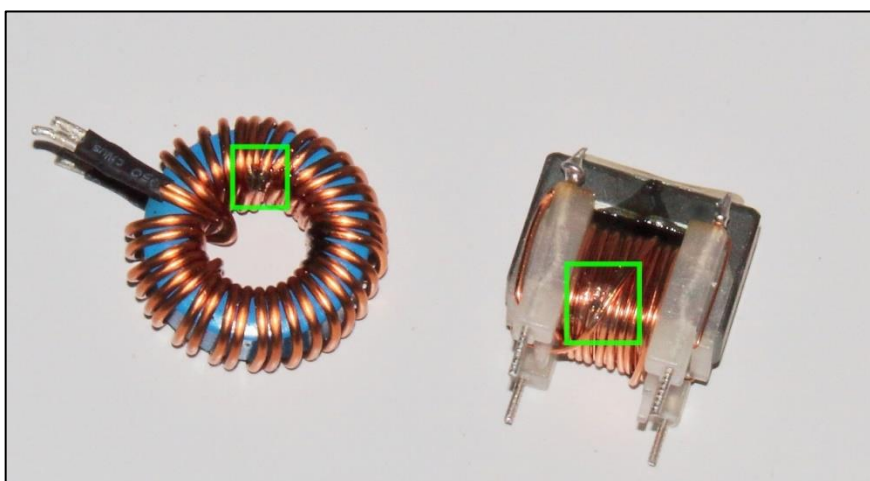
Obrázek 35: Pohled na zařízení svrchu.



Obrázek 36: Kryt zařízení s nalepenými popisky nad konektory. *TRG* je externí spoušť osciloskopu, *OUT* je výstupní napětí z měřicího děliče, *DC 12 V* je napájecí vstup a *COM* je komunikační rozhraní.

2.4 Měření na přípravku

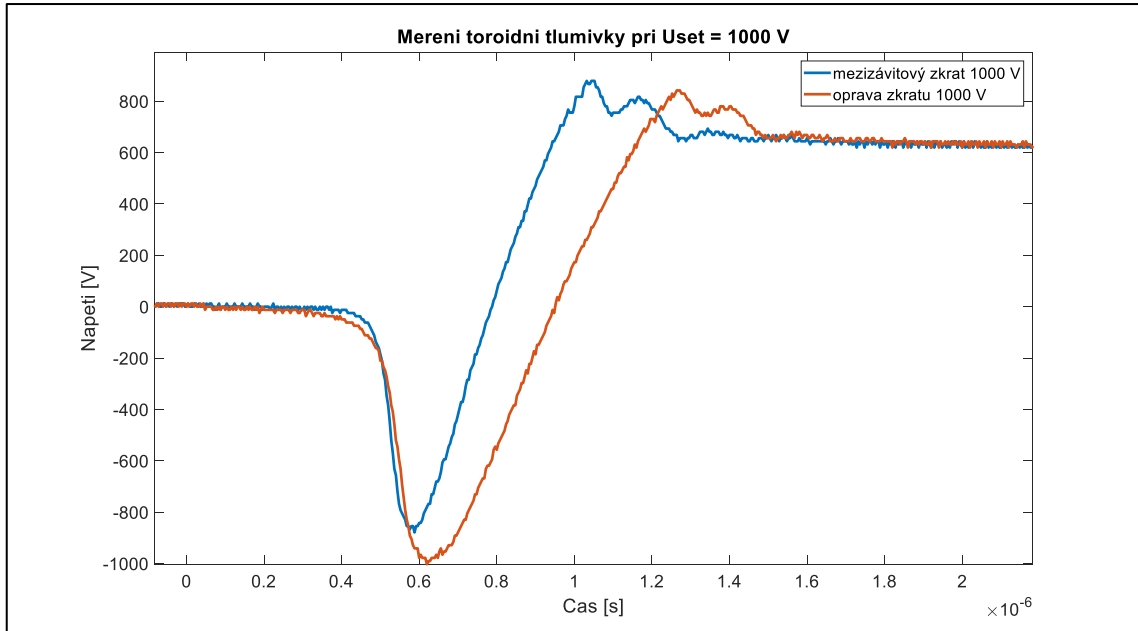
Po zhotovení celého přípravku byla provedena testovací měření pro dvě součástky – železo-prachovou toroidní tlumivku a zvyšující transformátovek pro spínaný zdroj. Mezi jednotlivými pokusy byly fyzickými zásahy měněny parametry obou cívek – například porušením izolace mezi dvěma závity a nanesením pájky, čímž byl vytvořen mezizávitový zkrat. V případě transformátoru bylo také zkratováno sekundární vinutí. Na obrázku níže je fotografie obou předmětů.



Obrázek 37: Měření cívek. Zeleným obdélníkem jsou vyznačena místa, kde byl vytvořen zkrat.

2.4.1 Toroidní cívka

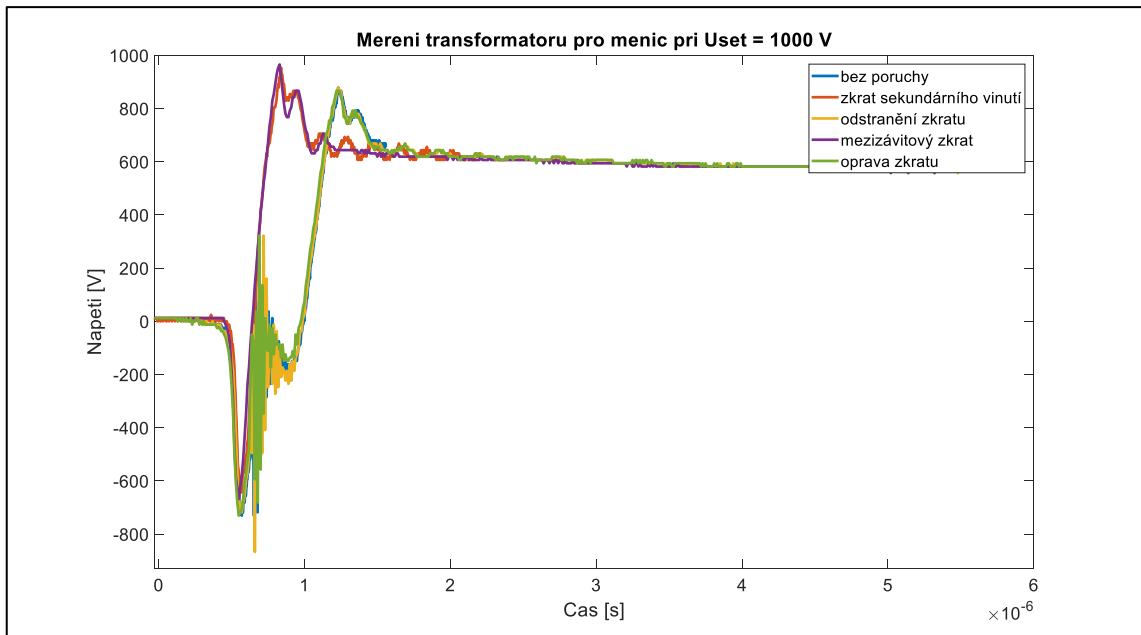
U železo-prachové toroidní tlumivky bylo provedeno několik měření s různým napětím. Vybrány byly ale jen pokusy s napětím 1000 V, a to s mezizávitovým zkratem (poškozená izolace s nanesenou pájkou) a bez něj. Na grafu níže je vidět, že při spojení dvou závitů dojde ke zkrácení periody vlivem snížení indukčnosti.



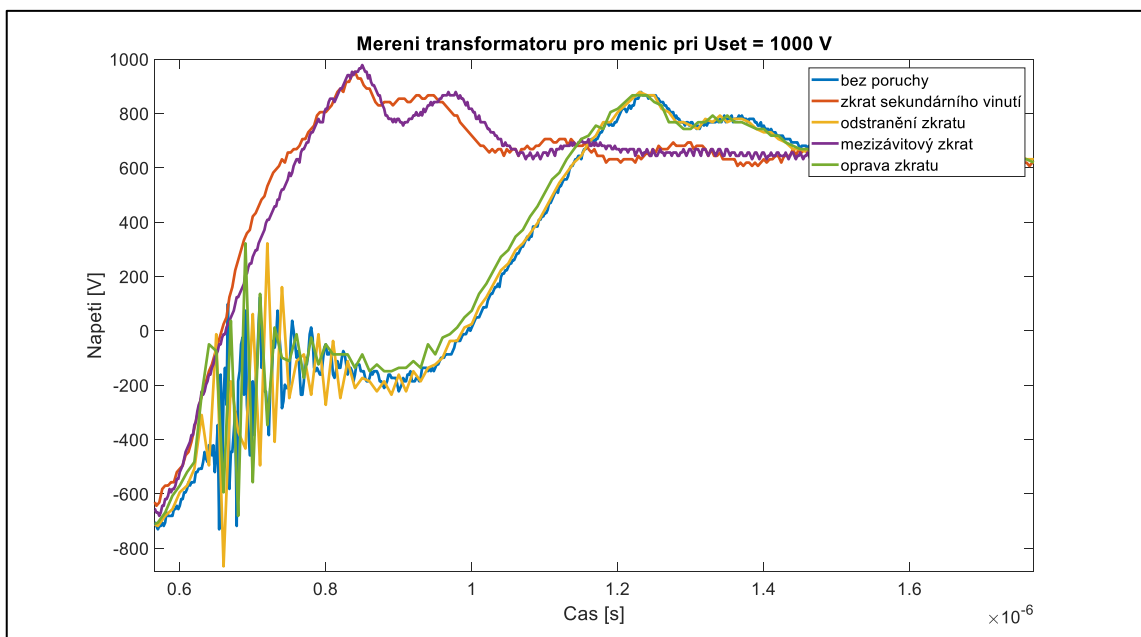
Obrázek 38: Odezva toroidní cívky pro testovací napětí 1 kV.

2.4.2 Zvyšující transformátor

U této součástky bylo nejdříve provedeno měření v bezvadném stavu. Poté bylo zkratováno sekundární vinutí a měření provedeno znovu. Vinutí bylo rozpojeno a kontrolně změřeno. Před dalším pokusem byla, podobně jako u předchozí cívky, poškozena smaltovaná izolace a proveden zkrat mezi 2 závitů primárního vinutí. Po změření byla vrstva pájky odstraněna a provedeno poslední kontrolní měření. Testovací napětí bylo ve všech případech nastaveno na 1000 V. Na obrázku níže jsou všechna měření vynesena do grafu.



Obrázek 39: Odezva transformátoru pro různé, uměle vytvořené, defekty.



Obrázek 40: Detail odezvy pro první část. Zde jsou viditelné zákmity při výboji.

Bylo zjištěno, že u měření beze zkratů vždy proběhl korónový výboj zřejmě na sekundární straně, což se projevilo zákmity v první části přechodové charakteristiky a prodloužením periody.

3 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala impulsní metodou měření cívek. Při této metodě se nejdříve nabije kondenzátor na vysoké napětí, poté je k němu pomocí polovodičového spínače připojena testovaná cívka a uzavře se RLC obvod. Při tom se kondenzátor a cívka dostanou do rezonance a vybudí větší kmit. Po komutaci tyristoru se uplatňují pouze parazitní kapacity cívky (kapacita mezi závity, kapacita mezi závitem a jádrem atd.) a kmity o větší frekvenci a menší amplitudě. Tyto děje jsou pozorovány na připojeném osciloskopu.

V teoretické části byly popsány základní parametry cívek. Každá cívka má nejen tu nejdůležitější vlastnost – indukčnost, ale i spoustu jiných, parazitních parametrů, jako např. parazitní odpor, který způsobuje ztráty zahříváním, útlum kmitočtové a impulsní charakteristiky a omezuje maximální proud. Dále jsou to parazitní kapacity dané izolací, které způsobují, že na jednom nebo spíše několika místech frekvenční charakteristiky dosahuje absolutní hodnota impedance maxima. Zde se hovoří o tzv. rezonančních frekvencích, které jsou také měřeny touto metodou.

V následné podkapitole bylo popsáno, jakým způsobem dosáhneme zvýšení napětí z malého na vysoké. Že existují různé typy zvyšujících měničů, jednak s galvanickým oddělením, jednak bez něho. Nábojové pumpy a násobiče napětí založené na sčítání napětí na kondenzátorech se ukázaly jako nevhodné z důvodu přílišného množství součástek. Z důvodu jednoduchosti a jistých autorových sympatií byl zvolen indukční Step-Up měnič s tlumivkou do plošného spoje, který funguje na základě Faraday-Lenzova zákona. Nevýhodou tohoto řešení byl nutný nákup vysokonapěťového MOSFET tranzistoru, který byl poměrně drahý a těžko dostupný.

V praktické části byl proveden návrh schématu, desky plošných spojů, zhotovení výrobku a následné testovací měření pro dvě cívky. Nejdříve byla provedena rešerše různých zapojení zvyšujících měničů, která byla nalezena na Internetu. Jako vítěz zde vyšel již zmiňovaný indukční Step-Up měnič s tlumivkou, jehož spínací tranzistor je ovládán z digitálního výstupu jednotky Arduino Nano přes budicí obvod. Poté bylo použito simulační prostředí Microcap, kde bylo vytvořeno schéma jak zvyšujícího měniče, tak i poté měřicí metody, a provedeny simulace. Indukční cívka byla zvolena s co nejvyšší indukčností, aby i účinnost byla přijatelná, a v co nejlepším cenovém i prostorovém rozmezí. Schéma bylo také otestováno fyzicky na nepájivém kontaktním poli s otvory pro součástky. Výsledky se jeví jako uspokojivé.

Dále se přešlo na finální zhotovení výrobku. Byla objednána krycí krabice, do které bylo celé zařízení nainstalováno. Byl proveden návrh desky plošných spojů v CADovém softwaru Eagle, kde bylo nejdříve vytvořeno schéma a poté podle něj i rozvržení součástek a vodivých cest. Deska je oboustranná a součástky jsou z části klasické THT a z části povrchové SMD, což umožňuje úsporu místa. Byl také zhotoven oddělovací transformátor pro externí spoušť do osciloskopu, jehož primární vinutí je připojeno ke zdroji v okamžiku zapálení výstupního tyristoru. Galvanické oddělení bylo nutné z důvodu, že tyristor v tomto případě vyžaduje kontinuální buzení hradla, neboť

anodový proud nepřesahuje přídržný proud nutný k udržení v sepnutém stavu. Společná země osciloskopu se tak musí nacházet na kladné elektrodě kondenzátoru.

Také bylo vytvořeno komunikační rozhraní s počítačem, což se uplatní například při automatizovaném měření pomocí MATLABu. Zde bylo nutno řešit stejný problém, jako s externí spouští osciloskopu, totiž galvanické oddělení, neboť zem USB na počítači je připojena na stejný potenciál, jako stínění BNC konektorů osciloskopu, totiž vodič PE v rozvodné soustavě. Toto bylo vyřešeno pomocí optočlenů s optickým oddělením. Komunikace je rychlostí 9600 baudů, na což tyto součástky postačují. Ovšem tento problém byl řešen až po zhotovení hlavní DPS, takže muselo být použito provizorní řešení v podobě univerzálního oboustranného plošného spoje s otvory pro pájení. Zdířka USB-B a převodník mezi USB-B a UART byly připevněny na jednostranné cuprexitové desce a drážkami. Všechny desky a konektory byly nainstalovány do polystyrénové krabičky, do níž byly vyříznuty otvory pro LCD displej a jednotlivé konektory.

Důležitým faktorem pro funkci celého zařízení je řídicí jednotka. Zde, pro svou jednoduchost a cenovou dostupnost, byl použit vývojový kit Arduino Nano. Programování je snadné a není potřeba používat programovací zařízení, stačí jen připojit pomocí vhodného USB kabelu do připravené zdířky. Umožňuje několikanásobný přepis programové paměti.

Celý program byl navržen jako jednoduchý stavový automat s celkem 6 základními stavy a 4 inicializačními mezistavy. Jsou zde 2 režimy obsluhy, a to místní pomocí klávesnice a dálkový pomocí SCPI povelů. Přepnutí do režimu dálkového je pomocí příjmu příkazu „syst:rem“ a přepnutí zpět na místní obsluhu je stisknutím písmene „A“ na membránové klávesnici, přilepené na víko krabičky.

Nakonec bylo provedeno zkušební měření se 2 cívkami – toroidem a zvyšujícím transformátorkem pro spínaný zdroj. Naměřená data byla z osciloskopu uložena na USB Flash disk a poté zobrazena do grafů v MATLABu. Byl zde zjištěn rozdíl průběhu oproti simulaci. Zaprvé je zde otočena polarita napětí. Zadruhé u simulace napětí na cívce po uzavření tyristoru kleslo pod nulu a kmitalo vlivem vlastní kapacity. U reálného přípravku sice také docházelo ke kmitání, ovšem napětí klesalo k nule velmi pomalu.

Problémy byly zaznamenány u kalibrace měřicího napěťového děliče, neboť zde z neznámých důvodů nebylo možno dosáhnout převodového poměru 1:50, ačkoliv hodnoty rezistorů a kondenzátorů byly vypočítány správně. Zejména u transformátoru je také vidět, že záporná půlvlna vybíjecí křivky má menší amplitudu, než následná kladná. Zřejmě dělá problém připojení kladného pólu hlavního kondenzátoru na zem osciloskopu a to, že zdroj napětí (kondenzátor 10 nF) je příliš měkký a dochází k dobíjení kondenzátorů kapacitní kompenzace napěťového děliče.

Seznam použité literatury

- [1] Mayer, D. Teorie elektromagnetického pole (2 díly). ZČU, Plzeň, 2004.
- [2] Marchevsky M., Ravaioli E., Ambrosio G., Impulse testing of coils and magnets: present experience and future plans. MQXF Workshop on Structure, Alignment, and Electrical QA, CERN, 2016
- [3] ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE. VYBÍRAL, Bohumil. *Fyzikální olympiáda* [online]. Praha: Fyzikální olympiáda, 2017 [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/indukce.pdf>
- [4] Flat Spiral Air Core Coil Inductor Design Equations Formulas Calculator: Science Physics Electricity. *Hicalc* [online]. CUI WEI, 2010 [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: https://www.ajdesigner.com/phpinductor/flat_spiral_air_coil.php
- [5] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. Praha: BEN, 2002, 243 s. ISBN 80-86056-91-0.
- [6] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. Praha: BEN, 1999, 393 s., front. ISBN 80-86056-49-X.
- [7] Rezonance. *Fyzikální sekce Matematicko-fyzikální fakulty UK* [online]. Praha: Karlova Univerzita, 2014 [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/sbirka/TEORIE/rezonance.html>
- [8] Cívka (Inductor). *Frik's web* [online]. www.frik.cz [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: http://www.frik.cz/elektro/components/inductor_cs.php
- [9] SLINTÁK, Vlastimil. DC/DC měniče. *UART.CZ* [online]. UART.CZ Electronics, programming and stuff..., 2013 [cit. 2017-10-30]. Dostupné z: <https://uart.cz/952/dc-dc-menice/>
- [10] ČERNÍK, Martin. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Stejnoseměrné měniče: přednášky – výkonová elektronika*. Liberec, 2014.
- [11] SCHMIDT-WALTER, Heinz. *Switch Mode Power Supplies* [online]. Dieburg: Heinz Schmidt-Walter [cit. 2017-11-15]. Dostupné z: http://schmidt-walter-schaltnetzteile.de/snt/snt_eng/snte_pdf.html
- [12] Nábojová pumpa jako DC/DC měnič 12/240V. *My ideas* [online]. Praha: My ideas, 2008 [cit. 2017-10-30]. Dostupné z: <http://arambajk.blogspot.cz/2008/05/nbojov-pumpa-jako-dcdc-mni-12240.html>
- [13] KLIPSTEIN, Donald. Hacking the Kodak Max Single Use Flash Camera into a Self-Repeating Strobe. *Don Klipstein's Web Site!* [online]. [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: <http://donklipstein.com/kmaxhack.html>
- [14] Arduino-Based DIY Voltage Booster (EE Tip #117). In: *Circuit Cellar* [online]. East Hartford, USA: KCK Media, 2014 [cit. 2017-11-07]. Dostupné z: <http://circuitcellar.com/ee-tips/arduino-based-diy-voltage-booster-ee-tip-117/>
- [15] Bias Supply Powers Low-Power Geiger-Mueller Tube. *Maxim Integrated* [online]. USA: Maxim Integrated Products, 2006 [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3757>

- [16] NAVRÁTIL, Petr. *Měnič z 12 V na 230 V s ochranami*. Brno, 2014. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=88334. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. David Kubánek, Ph.D.
- [17] Nouzové osvětlení zářivkou. In: *Analogové konstrukce a schéma zapojení* [online]. Moravská Třebová: AmaPro [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: http://www.amapro.cz/datove_zdroje/ar/konstrukce_ar_1/ar1_291.php
- [18] Obvod 555 jako budič MOSFET podruhé. In: *Robodoupě.cz: Web nejen o robotice* [online]. Praha: RoboDoupě, 2016 [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2016/obvod-555-jako-budic-mosfet-podruhe/>
- [19] Klávesnice membránová 4x4. In: *Arduino shop* [online]. Havlíčkův Brod: ECLIPSE, 2016 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/docs/produkty/0/136/1500635994.pdf>
- [20] LCD displej. *Arduino Shop* [online]. Havlíčkův Brod: ECLIPSE, 2016 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://navody.arduino-shop.cz/zaciname-s-arduinem/lcd-displej.html>
- [21] *Arduino: Tutorials* [online]. Arduino, 2018 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/HomePage>
- [22] TTL-232R-PCB: TTL to USB Serial Converter PCB Datasheet. *FTDI Chip* [online]. Glasgow, UK: Future Technology Devices International, 2010 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/Cables/DS_TTL-232R_PCB.pdf
- [23] 4N35, 4N36, 4N37: Optocoupler, Phototransistor Output, with Base Connection. *Vishay* [online]. Malvern: Vishay Semiconductors, 2010 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/81181/4n35.pdf>
- [24] Interfacing with OPTO isolator TTL. In: *Arduino Forum* [online]. Arduino, 2011 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=51173.msg365385#msg365385>

Seznam příloh na CD

- Text práce ve formátu PDF
- Program pro řídicí jednotku Arduino ve formátu INO
- Schéma a deska testeru v prostředí Eagle ve formátech SCH, BRD a PDF
- Simulační schémata v prostředí Microcap ve formátu CIR
- Soubory dat z osciloskopu ve formátu CSV, TXT
- Soubor pro zobrazení do grafu ve formátu M
- Fotodokumentace