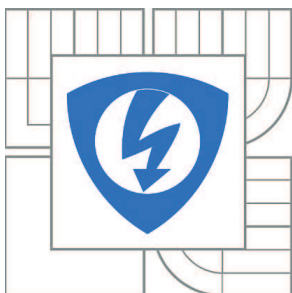


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## ŘÍZENÝ ZDROJ PULZNÍHO ELEKTRICKÉHO POLE

CONTROLLED SOURCE OF PULSED ELECTRIC FIELD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

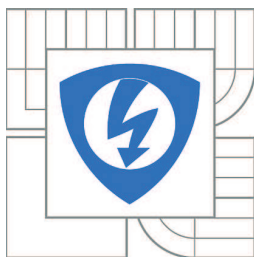
Bc. JOSEF BURIAN

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV KOTON, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Telekomunikační a informační technika

**Student:** Bc. Josef Burian

**ID:** 119368

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2012/2013

## NÁZEV TÉMATU:

### Řízený zdroj pulzního elektrického pole

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte koncepci výkonového zdroje určeného ke generování pulzního elektrického pole pro potřeby technologického procesu elektroporace ovocných moštů a rmutů. Na základě skupiny vhodných časových průběhů elektrického pole navrhněte soustavu přepínatelných kapacitorů a induktorů. Navrhněte a realizujte základní řídicí jednotku spolu se spínacími tranzistory.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Fincan, M., De Vito, F., and Dejmek, P. Pulsed electric field treatment for solid-liquid extraction of red beetroot pigment, *Journal of Food Engineering*, 64, 381-388, 2004.

[2] De Vito, F., Donsi G, and Ferrari, G. Effects of Pulsed Electric Field on permeabilization of cell membranes of fruits and vegetables, in *Proc. Intrafood, Innovations in Traditional Foods*, Valencia, Spain, 2, 1515-1518, 2005.

**Termín zadání:** 11.2.2013

**Termín odevzdání:** 29.5.2013

**Vedoucí práce:** Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

# ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je návrh výkonového zdroje určeného pro generování pulsního elektrického pole pro potřeby technologického procesu elektroporace ovocných moštů a rmutů. Na základě požadovaných impulsů dále navrhnout síť přepínaných kapacitorů a induktorů. Navrhnout a realizovat základní řídicí jednotku spolu se spínacími tranzistory.

Práce bude obsahovat výpočty a simulace využité při samotném návrhu doplněné o konstrukční řešení a naměřené hodnoty. Tato diplomová práce je rozdělena do několika základních částí.

V první části jsou detailně rozebrány teoretické poznatky o procesu elektroporace, podle kterých jsou pak vybrány požadované vlastnosti generovaných pulsů.

V druhé části jsou dopodrobna popsány jednotlivé části elektroporačního pracoviště, od zdroje přes kontrolní systém až po elektrodovou komoru. U každé z těchto částí jsou uvedeny různé, možné varianty řešení.

V další části je již přistoupeno k samotnému návrhu zdroje. Jsou zde vypsány jednotlivé, požadované parametry pulsů a podle nich jsou postupně prováděny výpočty a návrh.

Další část se zabývá simulacemi, které slouží pro ověření vypočtených hodnot a poměrů v elektroporovaném vzorku.

Předposlední část se zabývá samotnou mechanickou konstrukcí pracoviště. Jsou zde popsány dílčí problémy konstrukce a ožívování výrobku.

Poslední část je věnována měření na samotném pracovišti a rozboru naměřených výsledků.

## KLÍČOVÁ SLOVA

elektroporace, pulsní elektrické pole, zdroj, spínač

# **ABSTRACT**

The aim of this master thesis is to design a power source for generating pulsed electric field for the needs of the technological process of electroporation of fruit musts and mashes. To design further the network of switched capacitors and inductors based on the required pulse and to design and implement the basic control unit together with the switching transistors.

The thesis will include calculations and simulations used in the draft, also design solutions and measured values. This thesis is divided into several basic parts.

In the first part there is discussed in detail the theoretical knowledge of electroporation and the desired characteristics of generated pulses are chosen according to this knowledge.

Each part of electroporation workplace is described in the second part of this thesis, beginning from the source through the control system to the electrode chamber. For each of these parts are given different possible alternatives.

In the next chapter is already proceeded to the design of the source. There are listed required parameters of the pulses and according to them calculations and the design are gradually carried out.

Another chapter deals with the simulations, which are used to verify the calculated values and conditions in the electroporated sample.

Last but one part discusses the mechanical design of the workplace. There are described all problems of the construction and commissioning of the product.

The last section is dedicated to the workplace measurement and analysis of the measured results.

# **KEYWORDS**

electroporation, pulsed electric field, source, switch

BURIAN, J. *Řízený zdroj pulzního elektrického pole*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 70 s., 3 s. příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Koton, Ph.D..

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Řízený zdroj pulsního elektrického pole jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce Ing. Jaroslavu Kotonovi Ph.D. za velmi užitečnou metodickou pomoc a cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

# OBSAH

## Seznam obrázků

## Seznam tabulek

<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>1 Elektroporace</b>	<b>12</b>
1.1 Reversibilní elektroporace .....	12
1.1.1 Využití reversibilní elektroporace [17].....	13
1.2 Ireversibilní elektroporace .....	14
1.2.1 Ireversibilní transformace v lékařství .....	14
1.2.2 Ireversibilní transformace v potravinářském průmyslu .....	15
<b>2 Eletroporační pracoviště</b>	<b>20</b>
2.1 Vysokonapěťový pulsní generátor.....	20
2.2 Kontrolní systém.....	24
2.3 Elektrodová komora.....	25
<b>3 Návrh</b>	<b>27</b>
3.1 Požadované parametry výstupních pulsů.....	27
3.2 Výpočet vlastností elektrodové komory .....	27
3.3 Výpočet potřebného výkonu zdroje pro impulsy 1000 V .....	29
3.4 Banka kondenzátorů .....	30
3.5 Řídící obvody.....	31
3.6 Výkonové, spínací obvody .....	37
<b>4 Simulace</b>	<b>42</b>
4.1 Simulace elektrického pole v programu ANSYS .....	42
4.2 Simulace chování obvodu.....	49
<b>5 Konstrukce</b>	<b>52</b>
5.1 Deska řídicích obvodů .....	52
5.2 Deska výkonových spínačů .....	53
5.3 Deska banky kondenzátorů .....	55

5.4	Osazení desek .....	56
<b>6</b>	<b>Měření</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>64</b>
	<b>Literatura</b>	<b>66</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>68</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>70</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Reversibilní elektroporace.....	13
Obr. 1.2: Ireversibilní elektroporace.....	14
Obr. 1.3: Ukázka průběhu elektrických pulsů .....	17
Obr. 1.4: Výnos vinného moštu v závislosti na době lisování (převzato [17]).....	18
Obr. 1.5: Mikroskopický pohled na strukturu tkáně červeného vína (převzato [12]) ....	19
Obr. 2.1: Blokové schéma elektroporačního pracoviště .....	20
Obr. 2.2 : Průběh nabíjení kondenzátoru .....	21
Obr. 2.3: Zapojení pro generování exponenciálních pulsů .....	22
Obr. 2.4: Průběh exponenciálního pulsu.....	23
Obr. 2.5: Zapojení pro generování obdélníkových pulsů .....	23
Obr. 2.6: Průběh obdélníkového pulsu .....	24
Obr. 2.7: Zapojení pro generování bipolárních impulsů.....	24
Obr. 2.8: Rozložení elektrodové komory s paralelním uspořádáním elektrod .....	25
Obr. 3.1 : Porovnání vodivostí neošetřeného (vlevo) a PEF ošetřeného vzorku (převzato [12]) .....	28
Obr. 3.2: Schéma zapojení banky kondenzátorů .....	30
Obr. 3.3: Zapojení obvodu 555 jako AKO .....	32
Obr. 3.4: Průběh signálu generovaného prvním časovačem.....	32
Obr. 3.5: Průběh signálu na přímém výstupu klopného obvodu .....	33
Obr. 3.6: Signál pro řízení nabíjení.....	34
Obr. 3.7: Propojení logických členů .....	34
Obr. 3.8: Zapojení obvodu 555 jako MKO.....	35
Obr. 3.9: Délka pulsu 100 $\mu$ s .....	35
Obr. 3.10: Schéma obvodů řídicí desky.....	36
Obr. 3.11: Zapojení ovládání nabíjení banky kondenzátorů.....	38
Obr. 3.12: Zapojení stabilizátoru pro získání řídicího napětí .....	39
Obr. 3.13: Schéma zapojení křížového spínače .....	40
Obr. 3.14: Schéma výkonové desky .....	41
Obr. 4.1: Jednotlivé bloky projektu .....	42

Obr. 4.2: Geometrický model simulovaného prostoru .....	42
Obr. 4.3: Pokrytí modelu výpočtovou sítí.....	43
Obr. 4.4: Umístění elektrod A, B (vlevo) a umístění zemních prstenců A, B (vpravo) .....	43
Obr. 4.5: Graf rozložení elektrického potenciálu 3D (bez zemních prstenců, zemní prstence ve vzdálenosti 1cm a zemní prstence ve vzdálenosti 2 cm) .....	45
Obr. 4.6: Graf rozložení elektrického potenciálu 2D (bez zemních prstenců, zemní prstence ve vzdálenosti 1cm a zemní prstence ve vzdálenosti 2 cm) .....	46
Obr. 4.7: Graf intenzity elektrického pole 3D (bez zemních prstenců, zemní prstence ve vzdálenosti 1cm a zemní prstence ve vzdálenosti 2 cm) .....	47
Obr. 4.8: Graf intenzity elektrického pole 2D (bez zemních prstenců, zemní prstence ve vzdálenosti 1cm a zemní prstence ve vzdálenosti 2 cm) .....	48
Obr. 4.9: Schéma obvodu pro simulaci nabíjení banky kondenzátorů .....	49
Obr. 4.10: Napětí banky kondenzátorů v době $5\tau$ .....	50
Obr. 4.11: Schéma obvodu pro simulaci průběhu elektroporace.....	50
Obr. 4.12: Graf zobrazující pulsy napětí na ošetřovaném vzorku .....	51
Obr. 4.13: Průběh pulsů jednoho shluku.....	51
Obr. 5.1: Deska plošných spojů ze strany BOTTOM (vlevo) a TOP (vpravo) .....	52
Obr. 5.2: DPS výkonové desky ze strany BOTTOM (65% originální velikosti) .....	53
Obr. 5.3: DPS výkonové desky ze strany TOP (65% originální velikosti) .....	54
Obr. 5.4: DPS banky kondenzátorů .....	55
Obr. 5.5: Osazená deska řídicích obvodů .....	56
Obr. 5.6: Osazená deska banky kondenzátorů.....	57
Obr. 5.7: Osazená deska výkonových spínačů .....	57
Obr. 6.1: Zobrazení pulsů na zátěži při vstupním napětí velikosti 75 V .....	59
Obr. 6.3: Zobrazení pulsů na zátěži při vstupním napětí velikosti 75 V (měřeno proti zemi) .....	60
Obr. 6.4: Detail jednoho pulsu při vstupním napětí velikosti 75 V .....	61
Obr. 6.5: Zobrazení pulsů na zátěži při vstupním napětí velikosti 350 V (měřeno proti zemi) .....	62
Obr. 6.6: Detail tří pulsů při vstupním napětí velikosti 350 V (měřeno proti zemi) .....	62
Obr. 6.7: Detail pulsu při vstupním napětí velikosti 350 V (měřeno proti zemi).....	63

# SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1: Požadovaná pravdivostní tabulka.....	34
--	----

# ÚVOD

V posledních letech dochází k masivnímu rozvoji využívání pulsního elektrického pole (PEF). Takzvaná elektroporace ať již vratná nebo nevratná se využívá v čím dál více oborech lidské činnosti. Největšího rozmachu se jí dostává v chemickém a potravinářském průmyslu. Tato diplomová práce bude věnována pouze jedné specifické činnosti a to ošetřování vinných moštů a rmutů. Úkolem tohoto ošetření je zvýšit výnos moštu při lisování. Oproti dosavadním metodám, kterých je využíváno, nabízí elektroporace stejných nebo lepších výsledků při nižší spotřebě energie bez potřeby přidání dalších chemických či jiných akceleratorů. Z toho se pak odvíjí snižování nákladů. Proto jsou snahy o další rozvoj možných elektroporačních zařízení.

Diplomová práce je věnována návrhu pracoviště pro ošetřování vinných moštů a rmutů. Hlavní částí práce je návrh a realizace výkonového křížového přepínače, řídicích obvodů a banky kondenzátorů.

Samotný návrh musí být směřován k určitým požadovaným parametrům impulsů. Tyto parametry jsou určeny na základě zveřejněných studií, viz kapitola 1.

Další kapitoly jsou věnovány již návrhu a konstrukci. Je v nich uveden pracovní postup spolu s případnými problémy, které byly řešeny.

V neposlední řadě jsou v práci uvedeny použité simulace a naměřené hodnoty z realizovaného pracoviště.

# 1 ELEKTROPORACE

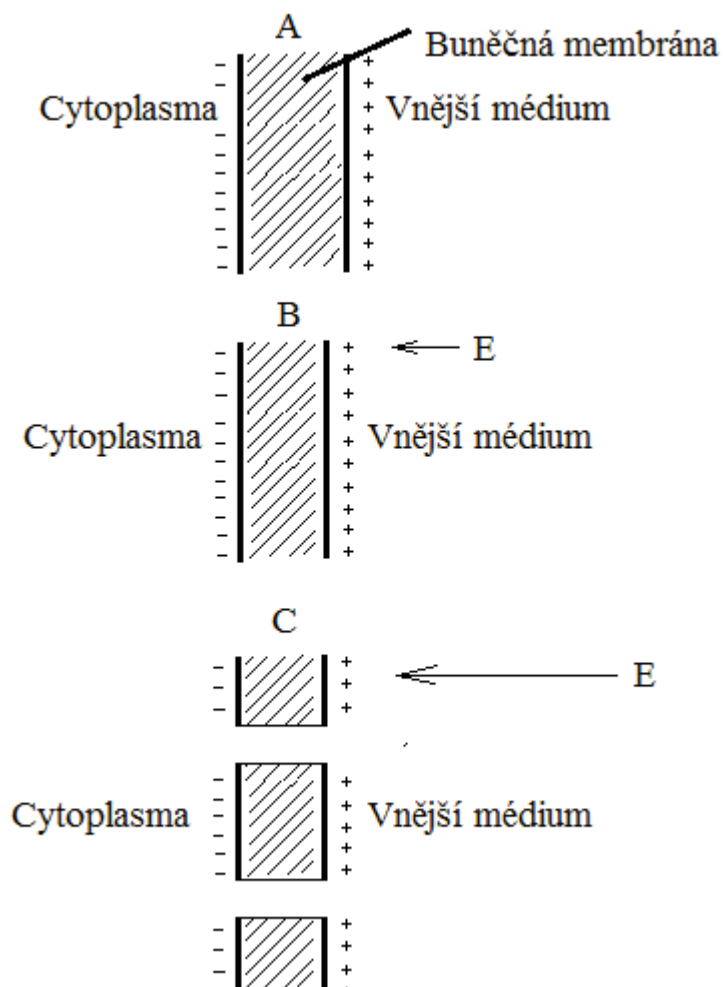
Elektroporace je fyzikální jev, při kterém vlivem působení silného elektrického pole dochází ke zvýšení elektrické vodivosti a propustnosti buněčných membrán. Někdy se také používá výraz ošetření pulsním elektrickým polem neboli PEF (Pulsed Electric Field).

Pokud je buňka vystavena elektrickému poli vysoké intenzity, řádově kV/cm, ve formě krátkých pulzů  $\mu\text{s}$  – ms, dochází v její membráně ke vzniku pórů. S rostoucí intenzitou roste i velikost vytvářených pórů. V případě, že je intenzita dostatečně velká, dochází k okamžitému rozpadu buněčných membrán, čehož se v posledních letech začíná hojně využívat. Značnou počáteční nevýhodou, která brání k rychlému rozvoji elektroporačních procesů je to, že každý typ buněk vykazuje různě vysokou odolnost. Závisí na mnoha parametrech, jako je například velikost buňky, pružnost membrány, permeabilita a podobně. Z tohoto důvodu je nutné provést vždy pro daný typ buněk sérii testů, při kterých se určí vhodný elektroporační postup (délka pulsu, počet opakování, síla elektrického pole, atd.) Podle toho, zda se buňky po odstranění elektrického pole zacelí nebo ne, potom dělíme elektroporaci na reversibilní nebo ireversibilní.

## 1.1 Reversibilní elektroporace

Jak již napovídá název, jedná se o děj reversibilní neboli vratný. Buněčná membrána je pružná, a pokud není překročena určitá kritická mez, membrána se vrací do původního stavu. Buněčná membrána je v tomto případě pouze zeslabena, případně se v ní objevují póry, které se po odstranění buňky z dosahu elektrického pole zacelí. Energie dodaná elektrickým polem v tomto případě nepřekročila kritickou hranici  $E_p < E_K$ .

Jak je vidět na Obr. 1.1, v případě A není přiloženo elektrické pole, membrána má svoji obvyklou tloušťku, nedochází k žádné deformaci či perforaci. Případ B zobrazuje stav, kdy je buňka vložena do elektrického pole nízké intenzity, jak je vidět dochází k hromadění náboje v okolí membrány a následnému zužování membrány. Na obrázku C je buňka vložena do silnějšího elektrického pole, v její membráně se již začínají tvořit póry. Tyto póry ovšem po odstranění elektrického pole zanikají a membrána se vrací do původního stavu.



Obr. 1.1: Reversibilní elektroporace

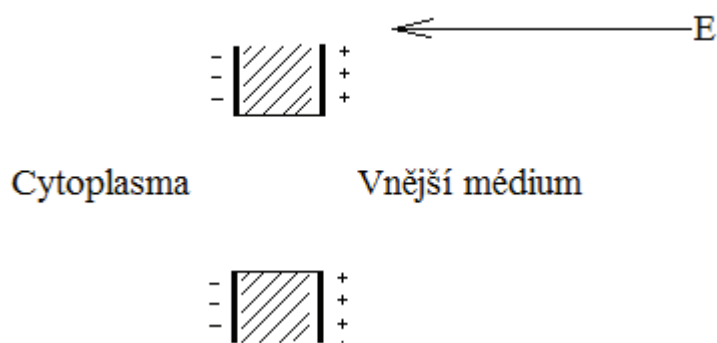
### 1.1.1 Využití reversibilní elektroporace [17]

Reversibilní transformace se v současnosti hojně využívá v molekulární fyzice. Například při úpravě buněčné DNA [17].

Při správném nastavení parametrů, je elektroporace účinná téměř na všechny typy buněk. Je dosahováno vysoké účinnosti přenosu požadované DNA, ve studii elektrotransformace E.coli převzalo po elektroporaci cizí DNA 80% buněk [17]. Elektroporace také omezuje porušení tkáně, byl proveden úspěšný přenos DNA do neporušené tkáně myšího mozku, to ovšem platí pouze při správném nastavení délky pulsů a jejich intenzity. Při špatně nastavených parametrech dochází naopak k výraznému poškození buněk.

## 1.2 Ireversibilní elektroporace

Jedná se o elektroporaci, při které dochází k nevratnému poškození buněčných membrán. V buněčné membráně vznikají póry, které již překračují její mez pružnosti, a proto již není možná její obnova ani po odstranění elektrického pole. Dochází tedy k destrukci buňky. To nastává v případě, když energie dodaná elektrickým polem přesáhne kritickou mez  $E_P > E_K$ .



Obr. 1.2: Ireversibilní elektroporace

Na Obr. 1.2 je patrné, že v membráně již vlivem příliš silného elektrického pole vznikají póry, které nemohou být zaceleny.

Ireversibilní transformace nachází v posledních letech uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti.

### 1.2.1 Ireversibilní transformace v lékařství

V lékařství se například testuje její použití pro účely odstraňování benigních nebo maligních nádorových buněk [14]. Na oblasti nádorů jsou pomocí elektrod cíleně aplikovány pulsy o vysoké intenzitě elektrického pole, dochází k ireversibilní elektroporaci buněk a nádor odumírá. Oproti současné léčbě je tento zákrok méně invazivní a nenarušuje okolní tkáň jako třeba termální léčba, při které dochází také k částečnému poškození okolní tkáň. Před provedením samotného zákroku je ovšem nutné provést přesný výpočet a simulaci průběhu zákroku [9]. Nejprve je nutné pomocí zobrazovací technologie, např. CT vytvořit 3D obraz nádoru. Dalším krokem je analýza nádorových buněk, protože pro různé druhy buněk je zapotřebí použít různá napětí, délky pulsu a počty opakování. Po provedení simulace je celý zákrok již velmi rychlý, celý postup trvá obvykle cca 5 minut, což je další velkou výhodou oproti konvenčním postupům. U starší metody bylo značnou nevýhodou to, že byly používány impulzy o nízkých frekvencích a u pacientů proto docházelo ke svalovým křečím, které by mohly mít v krajním případě za následek až smrt. Proto bylo nutné před zákrokem pacientovi podat paralytickou látku, což s sebou vždy nese určité riziko. Tento nedostatek byl odstraněn u nové, vysokofrekvenční metody. Tato metoda využívá bipolárních pulsů na vysoké frekvenci, díky tomu ke křečím nedochází a není tedy

nutno podávat paralytické látky [9]. Obě tyto metody jsou zatím ve stádiu testování, ovšem u velké části pacientů vykazují lepší výsledky než klasické metody ať již termální nebo chemické.

## 1.2.2 Ireversibilní transformace v potravinářském průmyslu

### A) KONZERVACE

Při konzervaci jsou za pomoci elektroporace ničeny buňky mikroorganismů a patogenů, které způsobují kažení potravin. V současnosti se k procesu konzervace používá tzv. teplotní sterilace. Při této sterilaci je potravina zahřívána po delší dobu na teplotu nad 100 °C, tím jsou škodlivé mikroorganismy usmrceny. Bohužel tato metoda je vysoce energeticky náročná a navíc sterilovaná potravina ztrácí významnou část vitamínů a minerálů, což je nežádoucí. Při využití elektroporace k této degradaci potravin nedochází, přičemž účinnost usmrcení nežádoucích mikroorganismů je vyšší nežli v případě sterilace.

### B) SUŠENÍ

Na druhou stranu, buněčné membrány slouží také jako překážky v odstraňování intracelulární složky, většinou vody nebo směsi vody a rozpuštěných látek. Při rozbití těchto membrán dojde k uvolnění těchto látek a ty pak mohou být snadněji odvedeny.

Ovoce nebo zelenina, které byly před samotným sušením ošetřeny pulsním elektrickým polem vysoké intenzity, vykazovaly při testování mnohem vyšší úbytek vody za stejných podmínek sušení než vzorky, které ošetřeny nebyly.

Konkrétní měření byla provedena na vzorcích brambor a červených paprik [10]. U brambor byly zkoumány vzorky o velikosti 1x1x1cm. Bylo na ně působeno elektrickým polem v rozsahu 0,3-3 kV/cm, počet opakování pulsů byl v rozmezí 15-30. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při intenzitě pole 1,1 kV/cm a počtu pulsů 25. Za těchto podmínek klesla doba sušení přibližně na třetinu doby, kterou se sušily neošetřené vzorky.

Užití elektroporace bylo zkoumáno také při dehydrataci červené papriky. Plátky červené papriky o šířce 1cm byly před dehydratací ošetřeny různými metodami a poté byly sušeny po dobu šesti hodin. Plátky, které byly ošetřeny elektroporací (exponenciální průběh pulsů, 2,4 kV/cm, 300  $\mu$ s) vykazovaly nejlepší vlastnosti z netermických metod. Absolutně nejlepších výsledků bylo dosaženo při blanšírování vzorků ve vroucí vodě, kde docházelo k tepelné destrukci buněk, tato metoda je však velmi energeticky náročná a dochází k degradaci kvality vzorků. Oproti všem ostatním metodám vykazovala elektroporace průměrně o 25% vyšší rychlost sušení.

### C) ÚPRAVA CUKROVÉ ŘEPY

V současnosti se začíná využívat elektroporace i při zpracování cukrové řepy [6]. Jedná se o alternativu konvenčních tepelných úprav. Při testování byl zkoumán vliv intenzity a počtu pulsů na koeficient dezintegrace buněk. Síla elektrického pole byla testována v rozmezí 1,2 až 3,6 kV/cm a počet impulsu byl měněn v rozsahu 1-200 pulsů. Všechny



impulsy měly exponenciální tvar a frekvence opakování byla 1 Hz. Index rozpadu buněk v závislosti na intenzitě elektrického pole rostl nejméně v brzké fázi zhruba 1,2 – 2,4 kV/cm, od 2,4 do 3,6 kV/cm byl nárůst již pouze malý. Obdobný účinek měla i změna počtu pulsů. Od 1 do 5ti pulsů docházelo k rapidnímu nárůstu indexu rozpadu, v rozsahu 6-20 pulsů docházelo k nárůstu stále, ale ne už tak razantnímu o zhruba od 20 pulsů již index rozpadu zůstával víceméně konstantní.

Při srovnání klasické metody a elektroporace bylo zjištěno, že index rozpadu buněk, které byly ošetřeny elektroporací při parametrech 2,4 kV/cm, 20 exponenciálních pulsů s opakováním 1 Hz byl roven indexu rozpadu buněk vzorku, který byl vystaven teplotě 72 °C po dobu 15 minut. Pro získání 97% cukru byla rychlost extrakce zhruba 2-3x rychlejší při elektroporaci než při použití konvenčního tepelného přenosu. Navíc vláknina získaná ze vzorků ošetřených PEF obsahovala více sušiny než z konvenčně upravených vzorků přesně 30% ku 15% [6].

#### D) ZÍSKÁVÁNÍ MOŠTŮ

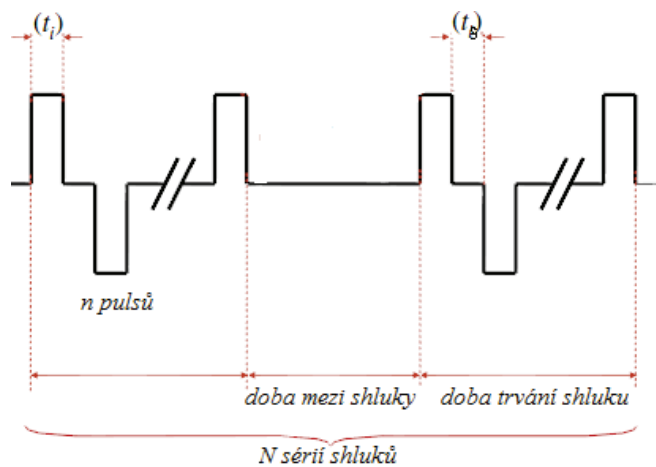
Jak již bylo psáno výše ireversibilní elektroporace se využívá také při získávání moštů. Obdobně jako při sušení je proces elektroporace prováděn před samotným lisováním. Ovoce je nejprve namleto na hrubé kusy, které jsou poté ošetřeny elektroporací. Po procesu elektroporace následuje samotný proces lisování. Při testování bylo prokázáno, že za pomoci elektroporace je možné dosáhnout až o několik desítek procent vyšších výnosů i při lisování za nižších tlaků [13]. Zkoumáním bylo také zjištěno, že výnos stoupal s počtem impulsů, tento trend se však projevoval pouze do 50-ti pulsů při vyšším počtu již výnos zůstával více méně stejný. Z toho plyne, že na výtěžnost má kromě síly elektrického pole a délky působení pulsu vliv také počet působících pulsů. V současnosti se pro destrukci buněčných membrán používá tepelné a enzymatické metody. Při tepelné metodě je šťáva lisována při vyšších teplotách což má za následek vyšší výnosy než při samotném lisování ovšem za cenu vyšších energetických nároků. Tato metoda má i další nevýhody, stejně jako při sterilaci jsou vyšší teplotou ničeny vitamíny a minerály. Tepelná metoda je většinou ještě navíc kombinována s metodou enzymatickou. Při této metodě jsou do rozemletého ovoce přidávány enzymy, ty napomáhají k rozkladu buněk. Vzhledem k reakcím, které jsou vyvolány biologickými katalyzátory, dochází ke snížení kvality extrahovaných šťáv, protože ve šťávě zůstávají po tomto procesu různá rezidua. Při použití enzymů se také ve šťávě snižuje hodnota pH a celkově vzrůstá celkový obsah kyselin což je opět nežádoucí. Tyto skutečnosti mají za následek další zvýšení provozních nákladů, protože v pozdějších fázích zpracování je vhodné tato rezidua opět odstranit. Oproti elektroporační metodě je navíc u obou ostatních metod zapotřebí více času. Při elektroporaci stačí, aby na šťávu působilo elektrické pole řádově sekundy, u tepelné metody trvá určitou dobu než je materiál zahřát na požadovanou teplotu a tato teplota musí také určitou dobu působit, aby bylo dosaženo potřebných výsledků. U enzymatické metody je zapotřebí také určitého času aby se enzymatické procesy vůbec nastartovaly. Pokud tato metoda není prováděna v ochranné atmosféře, nejčastěji CO<sub>2</sub> nebo N<sub>2</sub>, pak dochází k nežádoucí oxidaci moštu.

V posledních několika letech dochází k rozmachu využití PEF při zpracování révy

vinné. Při pokusech byl zkoumán vliv elektroporace na výnos šťávy u několika bílých, vinných odrůd, konkrétně Muškátu žlutého, Sauvignonu a Semilonu [17]. Vzorke byly ošetřeny bipolárním pulsním elektrickým polem o intenzitě 750 V/cm, doba trvání jednoho pulsu byla 100  $\mu$ s, doba mezi pulsy byla 100 ms. Po každém shluku pulsů byla 2 s dlouhá přestávka. Počet shluků se pohyboval v rozmezí 1 až 30. Celková doba působení elektroporačního procesu se dá určit ze vztahu.

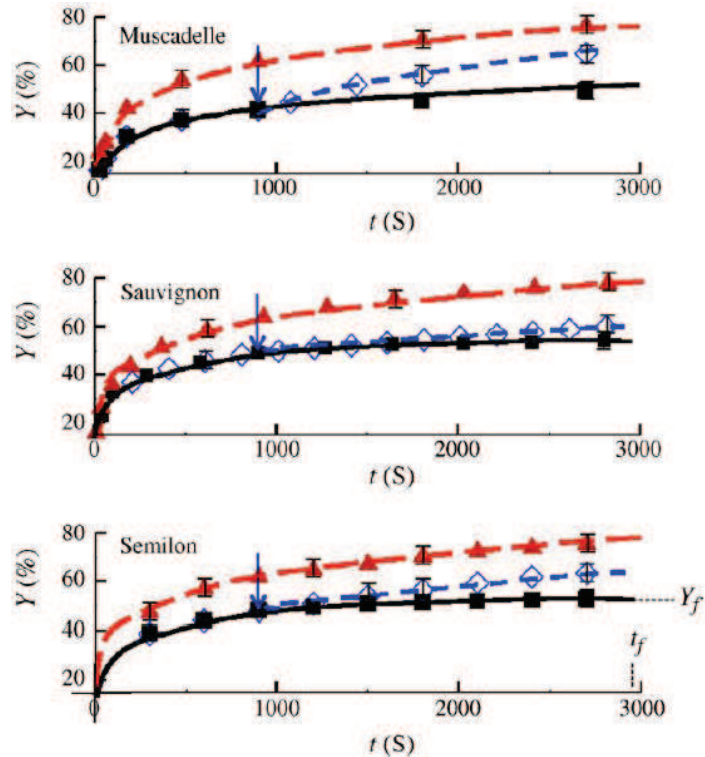
$$t_{PEF} = (n(t_i+t_b)+t_p)N \quad (1)$$

kde  $n$  je počet pulsů,  $t_i$  značí dobu trvání jednoho pulsu,  $t_b$  doba mezi jednotlivými pulsy,  $t_p$  je doba pauzy mezi jednotlivými shluky a  $N$  je celkový počet shluků. Průběh pulsů je možno vidět na Obr. 1.3.



Obr. 1.3: Ukázka průběhu elektrických pulsů

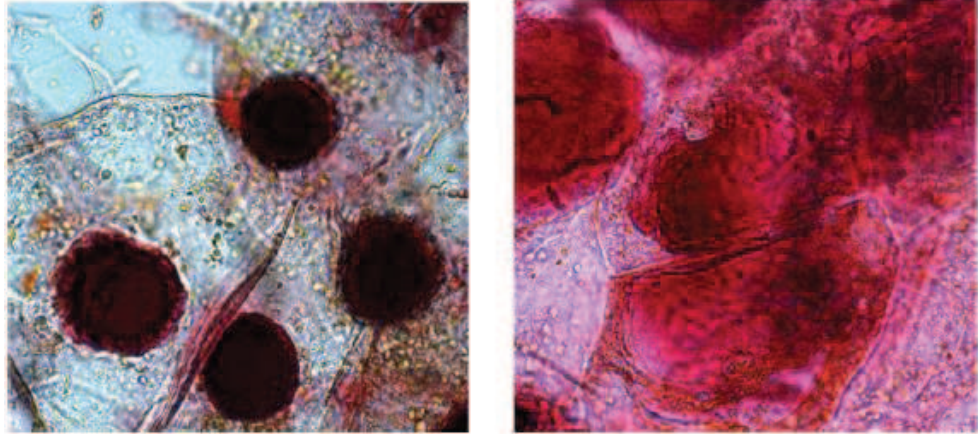
Na Obr. 1.4 je vidět závislost výnosu moštu na době lisování, pro 3 zkoumané odrůdy. V každém grafu lze vidět tři průběhy. Černý průběh značí výnos lisování z hroznů, které před lisováním nebyly nijak ošetřeny. Modrý průběh ukazuje výnos z hroznů, které byly nejprve lisovány po dobu 1000 s, po které se na nevylišovanou část nechalo působit pulsní elektrické pole, a poté bylo pokračováno v lisování. Jak je vidět do doby  $t = 1000$  s jsou průběhy stejné, protože jak v jednom tak i v druhém případě hrozny na začátku nebyly nijak ošetřeny. Po ošetření se oba průběhy vždy oddělují, přičemž výnos PEF ošetřeného vzorku je vyšší než u vzorku neošetřeného. Poslední, červený průběh ukazuje výnos z hroznů, které byly již před lisováním ošetřeny elektroporací. Jak je vidět, výnos z těchto vzorků je u všech tří zkoumaných odrůd nejvyšší.



Obr. 1.4: Výnos vinného moštu v závislosti na době lisování (převzato [17])

Lisování probíhalo po dobu 2700 s za konstantního tlaku 5 barů. Z dalšího zkoumání bylo zjištěno, že šťáva získaná z PEF ošetřených vzorků má nejen vyšší výnos ale také obsahuje nižší množství pevných látek.

U červeného vína je zapotřebí aby před lisováním došlo k uvolnění červeného barviva z vakuol uvnitř buněk. V současnosti se k tomu používá tepelné denaturace. Hroznová kaše je ohřata na teplotu 80 °C, tato teplota je udržována po dobu dvou minut a poté je kaše schlazena na teplotu přibližně 40 °C. Tento proces napomáhá rozbití vakouk, které jsou ohraničeny bilipidovými membránami. Elektroporace napomáhá také k rozbití buněčných membrán. Proto byly zkoumány možnosti využití při zpracování červeného vína. Při testování bylo zjištěno, že proces elektroporace má zhruba stejný vliv na otevření membrán jako v současnosti používaný proces denaturace. Energetické nároky při elektroporaci jsou ovšem nižší v řádu desítek % [17].



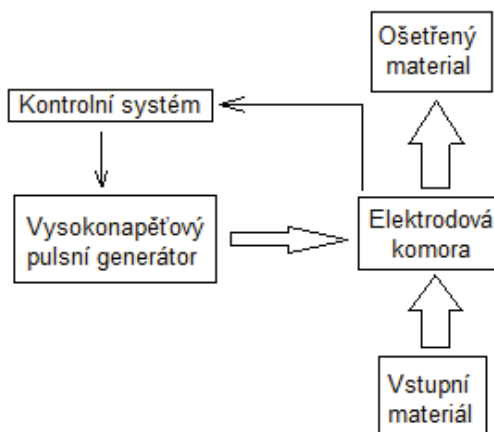
Obr. 1.5: Mikroskopický pohled na strukturu tkáně červeného vína (převzato [12])

Na Obr. 1.5 vlevo je vidět struktura červeného moštu odrůdy Frankovka před elektroporací, pravá část obrázku ukazuje tkáň po elektroporaci. Jak je patrné elektroporace umožnila uvolnění barviva, což je při zpracování vína žádoucí.

## 2 ELEKTROPORAČNÍ PRACOVISTĚ

Pracoviště pro ošetřování pulsním elektrickým polem se skládá ze tří základních částí Obr. 2.1.

- Vysokonapětového, pulsního generátoru
- Kontrolního systému
- Elektrodové komory



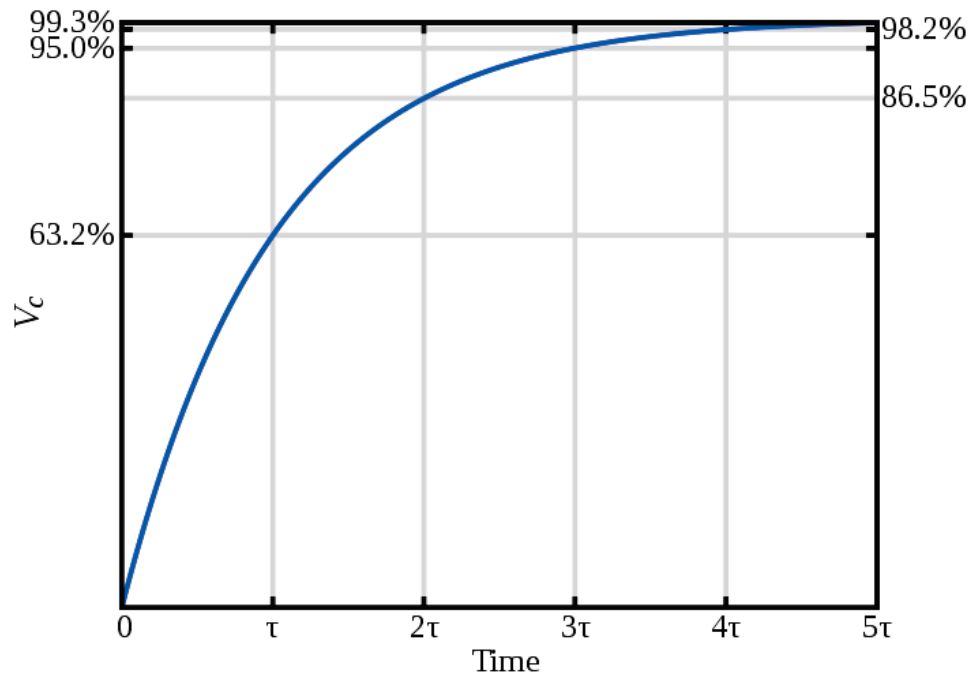
Obr. 2.2: Blokové schéma elektropračného pracoviště

### 2.1 Vysokonapětový pulsní generátor

Úkolem tohoto generátoru je poskytnout pulsy s vysokou amplitudou napětí o požadovaném tvaru a délce. K tomuto účelu většinou slouží více či méně složité tvarovací sítě. Tyto sítě se dle potřeby skládají z jednoho či více stejnosměrných zdrojů napětí, nabíjecího rezistoru, banky kondenzátorů, dále obsahují jeden či více přepínačů a podle potřeby také tvarovací cívky. Všechny součástky musí být samozřejmě dostatečně výkonově dimenzovány, protože v době pulsů dochází k rapidnímu, skokovému nárůstu protékajícího proudu.

Elektroprační zařízení jsou většinou napájena ze střídavé sítě 230/400 V. DC zdroj nabíjí banku kondenzátorů, které slouží jako zásobníky energie, na požadované napětí. Energie uložená v kondenzátorech je pak uvolňována velmi rychle ve formě impulsů. Důležité je právě, aby byla energie vybíjena formou pulsů, díky tomu pak vzniká požadované elektrické pole. Na napájecím zdroji také závisí výkonové vlastnosti a možnosti celého PEF zařízení. Určuje totiž jak rychle je možno opět nabít banku kondenzátorů na požadovanou úroveň: čím vyšší proud je zdroj schopen dodat, tím rychleji se kondenzátory nabíjí. Banka kondenzátorů se nabíjí přes nabíjecí rezistor, který tak omezuje rychlost nabíjení. Všeobecně je dáno, čím větší je nabíjecí rezistor, tím menší je nabíjecí proud, nabíjení trvá delší dobu a naopak. Rezistor je proto nutno volit přiměřeně k možnostem zdroje. Doba nabíjení samozřejmě závisí také na kapacitě kondenzátoru. Opět platí čím vyšší kapacita tím delší doba nabíjení, při stejném

nabíjecím proudem.



Obr. 2.3 : Průběh nabíjení kondenzátoru

Na Obr. 2.2 je vidět průběh nabíjení kondenzátoru v čase. Čas nabíjení je vyneseno v násobcích  $\tau$ , jedná se o časovou konstantu, která je rovna:

$$\tau = RC \quad (2)$$

kde  $R$  udává velikost nabíjecího odporu a  $C$  udává celkovou kapacitu nabíjené banky kondenzátorů. Jak je vidět na Obr. 2.2, nabíjení kondenzátoru má logaritmický průběh, proto je dobré volit kondenzátor s vyšším jmenovitým napětím. Pokud bychom měli například kondenzátor se jmenovitým napětím 1000 V, je možné ho nabíjet 1000 V DC, za dobu  $\tau$  se nabije na hodnotu 630 V. Pokud bychom měli ale kondenzátor se jmenovitým napětím 650 V, mohli bychom ho nabíjet pouze tímto napětím a na hodnotu 630 V by se nabíjel za dobu  $5\tau$ , tedy za dobu 5x takovou, pokud počítáme s tím, že kapacita kondenzátoru a nabíjecí rezistor budou v obou případech stejně velké.

Celková energie, která je uložena v bance kapacitorů, je dána vztahem:

$$W = \frac{1}{2} CU^2 \quad (3)$$

ve kterém  $C$  je celková kapacita banky kondenzátorů a  $U$  je napětí, na které je tato banka kondenzátorů nabita.

Vybíjení kondenzátorů se provádí přes spínač do elektrod v elektrodové komoře. Spínač je nejdůležitější složkou při tvorbě pulsů. Musí být schopen pracovat s velmi vysokými výkony při vysokých opakovacích frekvencích. Jako spínače se dá použít celá řada elektronických součástek, v zásadě je lze rozdělit do 2 základních skupin:

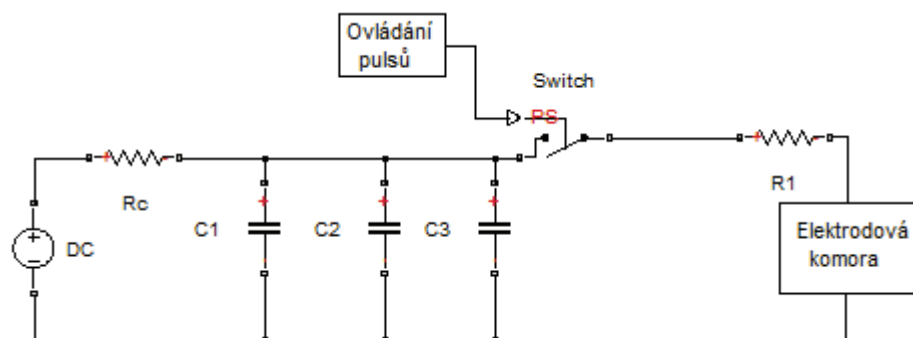
- ON spínače,
- ON/OFF spínače.

ON spínače jsou spínače, u kterých jsme schopni ovlivnit pouze čas sepnutí. Pokud tento spínač sepne, není možné ho rozepnout, zůstává sepnutý, dokud napětí neklesne pod určitou mez. Tato vlastnost je žádoucí, když je zapotřebí kondenzátory úplně vybit. Tyto spínače většinou zvládají spínat vyšší proudy a napětí než ON/OFF spínače. Hlavními nevýhodami jsou kratší životnost, schopnost pracovat na nižších frekvencích a obtížnost sepnutí. Většinou to jsou součástky pracující na principu ionizace plynu mezi dvěma elektrodami. Jedná se například o Tyatron nebo Trigatron.

ON/OFF spínače jak naznačuje jejich název, je možné sepnout ale i rozepnout v případě potřeby, což umožňuje generovat pulsy s délkou dle potřeby. Oproti ON spínačům mají lepší výkon, delší životnost, jsou schopné operovat s vyššími opakovacími frekvencemi a mají nižší spínací ztráty. Jedná se především o polovodičové součástky. Nevýhodou těchto prvků je především fakt, že dokáží spínat menší napětí a proudy, zpočátku byla problémem také cena těchto prvků, která ovšem v posledních letech klesá díky rozvoji polovodičové techniky. Mezi používané součástky patří GTO tyristory, SGCT tyristory nebo také tranzistory IGBT či MOSFET.

Generované impulsy mohou mít různé průběhy. V zásadě se používají dva typy průběhů, exponenciální nebo obdélníkové pulsy. Další možné dělení je na unipolární nebo bipolární průběhy.

Nejjednodušší zapojení je pro generování unipolárních, exponenciálních pulsů, které je možno vidět na Obr. 2.3.



Obr. 2.4: Zapojení pro generování exponenciálních pulsů

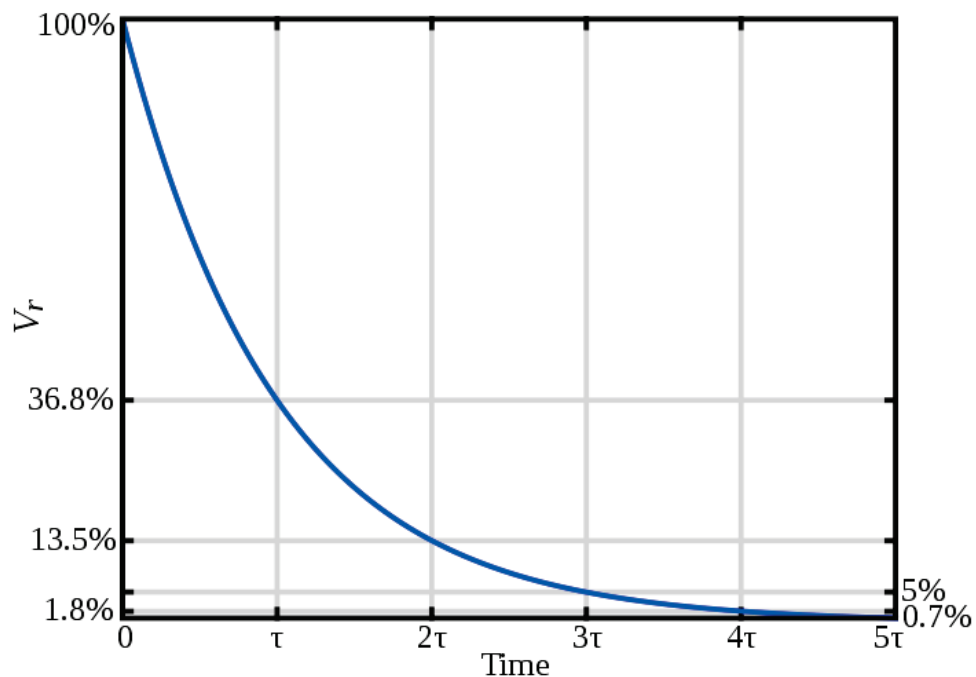
$R_c$  je nabíjecí odpor, kondenzátory  $C_1$ - $C_3$  jsou zásobníky energie a rezistor  $R_1$  upravuje odpor elektrodové komory, přes který dochází k vybití kondenzátorů.

Výstupní napětí je pak dáno vztahem:

$$U(t) = U_0 e^{-t/\tau} \quad (4)$$

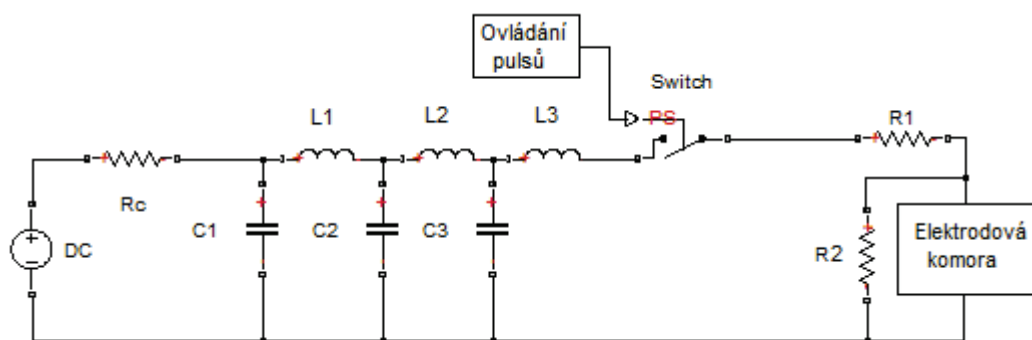
,kde  $U_0$  je počáteční napětí, na které je nabitá banka kondenzátorů,  $t$  značí čas a  $\tau$  udává časovou konstantu (2), přičemž  $C$  je kapacita banky kondenzátorů a  $R$  je součet předřadného odporu a odporu vzorku mezi elektrodami.





Obr. 2.5: Průběh exponenciálního pulsu

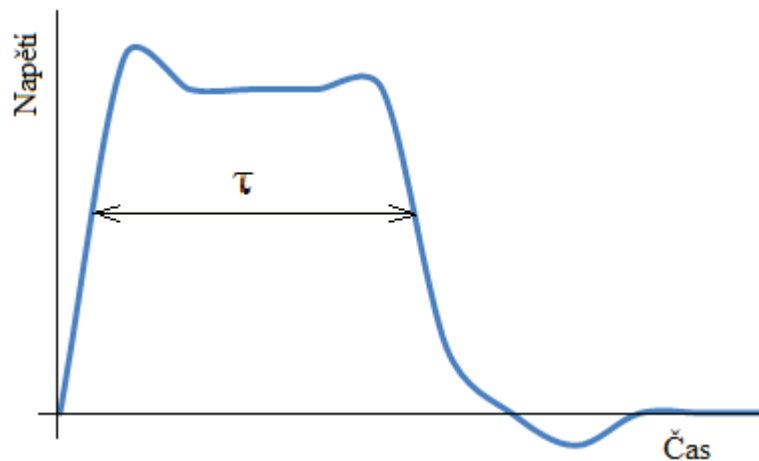
Pro generování obdélníkových pulsů je nutno vložit do obvodu cívky, které slouží jako zpožďovací vedení. Cívky musí být vybírány podle toho, jak dlouhé pulsy je zapotřebí generovat, většinou řádově  $\mu\text{s}$  –  $\text{ms}$ . Celkové uspořádání pak blokově odpovídá Obr. 2.5.



Obr. 2.6: Zapojení pro generování obdélníkových pulsů

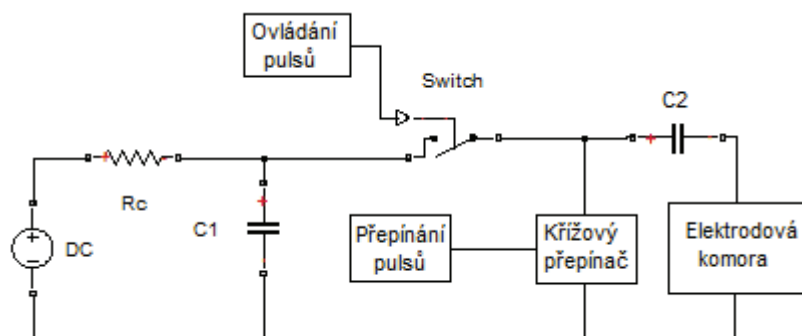
Napětí na elektrodách při vybíjení stoupne na maximální hodnotu a v té setrvá po celou dobu trvání pulsu, viz Obr. 2.6. Elektrické pole generované tímto druhem pulsů je konstantní, což zvyšuje efektivitu elektroporace. Právě z tohoto důvodu se začínají stále více prosazovat na úkor klasických exponenciálních generátorů.





Obr. 2.7: Průběh obdélníkového pulsu

Použitím dalších přepínačů je možno upravit zapojení tak aby docházelo ke generování bipolárních pulsů Obr. 2.7. Samozřejmě přidáním přepínačů dojde k dalšímu nárůstu složitosti celého zapojení, což je ovšem kompenzováno zvýšením účinnosti elektroporace. Bipolární pulsy snižují oxidaci elektrod a také snižují elektrolyzu ošetřovaného materiálu.



Obr. 2.8: Zapojení pro generování bipolárních impulsů

## 2.2 Kontrolní systém

Kontrolní systém je případnou nadstavbou u elektroporačního pracoviště. Nemusí být nutně vždy zařazen. Většinou se skládá ze dvou hlavních částí a to teplotní sondy a osciloskopu. Na osciloskopu je sledován průběh napětí na elektrodách, případně proudu, který protéká ošetřovaným materiálem. V případě náhlé změny některého z těchto parametrů je důležité odhalit příčinu, případně elektroporaci ukončit, aby nedošlo ke zničení celého pracoviště. Teplota je snímána uvnitř elektrodové komory. Musí být hlídána a v případě, že by byl její nárůst příliš velký, musí být elektroporace ukončena.

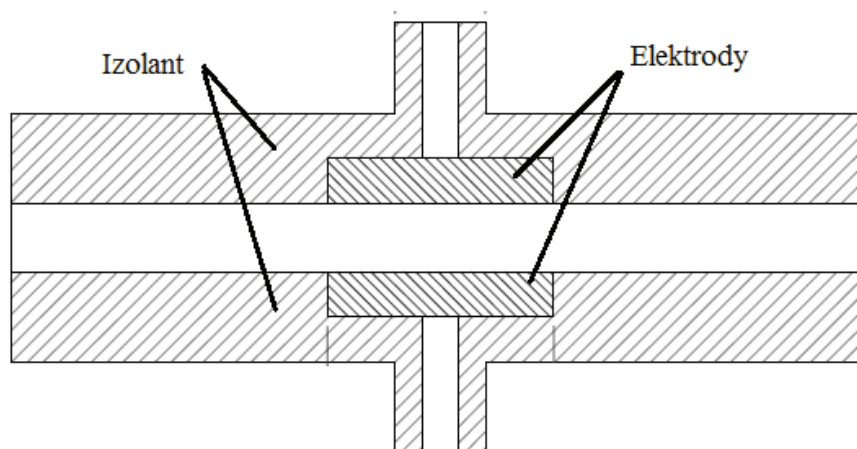
## 2.3 Elektrodová komora

Elektrodová komora je velmi důležitou, možná nejdůležitější, částí celého elektroporačního systému. Na její správné konstrukci je značně závislá efektivita celého elektroporačního procesu. V této komoře se přenáší energie elektrických pulsů na ošetřovaný materiál. V podstatě se jedná o dvě elektrody a izolační materiál.

Elektrody mohou mít různý tvar a také mohou být vyrobeny z různých materiálů. Je důležité, aby použitý materiál byl odolný vůči oxidaci, či proti chemické agresivitě ošetřovaných materiálů. Nemalou roli při výběru materiálů hraje také cena. Z tohoto důvodu se nejčastěji používá k výrobě elektrod nerezové oceli, která má dobré elektrické vlastnosti a je relativně levná. Samozřejmě že se v laboratorním prostředí využívá také jiných materiálů jako je například zlato, platina, uhlík, ale cena těchto materiálů značně převyšuje cenu nerezové oceli a pro zpracování v průmyslovém množství se jich nevyužívá.

Izolátor je důležitý pro celou konstrukci, elektrodové komory, udává její tvar a udržuje elektrody ve stálých pevně daných pozicích. Důležité je, aby elektrická pevnost použitého izolátoru byla vyšší než elektrická pevnost ošetřovaného materiálu. Tvar izolátoru udává také tvar celé komory. Je vhodné, aby materiál, ze kterého je komora vyrobena, byl snadno omyvatelný a chemicky inertní pro zachování kvality ošetřovaného materiálu. Nejčastěji se používá polyethylen, nylon, plexisklo, teflon a jim podobné [19].

Existuje několik možných geometrických uspořádání elektrod v komoře. Paralelní uspořádání dvou deskových elektrod, soustředné válcové elektrody, elektrody ve tvaru koncentrického kužele apod [19]. Různým uspořádáním elektrod lze dosáhnout různého rozložení intenzity elektrického pole. Všeobecně je snaha dosáhnout v celém prostoru elektrodové komory homogenního elektrického pole. Nejčastěji se využívá paralelního uspořádání dvou deskových elektrod s malou mezerou mezi nimi Obr. 2.8. Při tomto uspořádání je dosaženo dostatečné homogenity elektrického pole a tato konstrukce je celkem jednoduchá i na výrobu.



Obr. 2.9: Rozložení elektrodové komory s paralelním uspořádáním elektrod

Z bezpečnostních důvodů je nutno při návrhu konstrukce elektrodové komory neopomenout uzemnění. To musí být jak na vstupu, tak i na výstupu komory, protože zbytkové napětí může být změřeno ještě několik centimetrů od elektrod a potenciálně by mohlo dojít k úrazu elektrickým proudem.

Při konstrukci elektrodové komory je zapotřebí zahrnout do návrhu také ochranu zařízení proti neočekávaným poruchám, které se mohou v průběhu procesu vyskytnout. Může nastat situace, kdy ošetřovaný vzorek má příliš malou nebo naopak příliš velkou rezistivitu. Pokud je rezistivita vzorku příliš malá, zvýší se elektrický proud, který prochází obvodem. To může mít za následek přehřátí a destrukci přepínače. Z tohoto důvodu se před elektrodovou komoru přidává omezovač proudu. Jako omezovač se dá jednoduše použít předřadný odpor, viz  $R_1$  v Obr. 2.5. Pokud má ošetřovaný vzorek rezistivitu příliš velkou, dochází k vysokému úbytku napětí na přepínači, což může mít opět za následek jeho destrukci. Pro tento případ se do obvodu přidává další rezistor, tentokrát paralelně k elektrodové komoře, viz  $R_2$  v Obr. 2.5.

## 3 NÁVRH

Návrh zdroje musí probíhat v několika krocích. Nejprve musí být ujasněno, jaké výstupní pulsy chceme získat a jejich mezní parametry. Dále potřebujeme znát parametry ošetřovaného materiálu a v neposlední řadě se musíme zamyslet nad tím, jaké jsou možnosti součástek, které budeme mít při konstrukci k dispozici.

### 3.1 Požadované parametry výstupních pulsů

Jelikož víme, že zdroj bude sloužit k ošetřování vinných moštů a rmutů byly vybírány parametry, při kterých bylo dosaženo nejvyšší výnosnosti.

Na základě studia dostupné literatury, věnující se problematice elektroporace pomocí PEF [11], [13], [17] byly parametry výstupních pulzů zvoleny následovně:

- bipolární obdélníkové pulsy
- amplituda pulsů 1000 V
- počet pulsů ve shluku 10
- doba trvání jednoho pulsu 100  $\mu$ s
- doba mezi pulsy 100 ms
- perioda shluků 2 s

Dále víme, že vzdálenost mezi elektrodami bude 1 cm a plocha elektrod bude 10 cm<sup>2</sup>, tyto parametry jsou důležité pro výpočet celkového odporu ošetřovaného materiálu.

### 3.2 Výpočet vlastností elektrodové komory

Aby bylo možné vypočítat celkový odpor elektrodové komory, musela být nejprve změřena hodnota konduktivity ošetřeného materiálu. V našem případě se jednalo o mošt vinné odrůdy Cerason (červená odrůda). Cukernatost byla 22 °NM, pH 3,5 a měření bylo prováděno za pokojové teploty ca 20 °C, konduktometrem. Bylo provedeno několik měření a výsledné hodnoty se pohybovaly v rozmezí  $\sigma = 0,265 - 0,28$  mS/cm ((mS.cm)/cm<sup>2</sup>). Měrný odpor materiálu je roven převrácené hodnotě konduktivity tedy:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

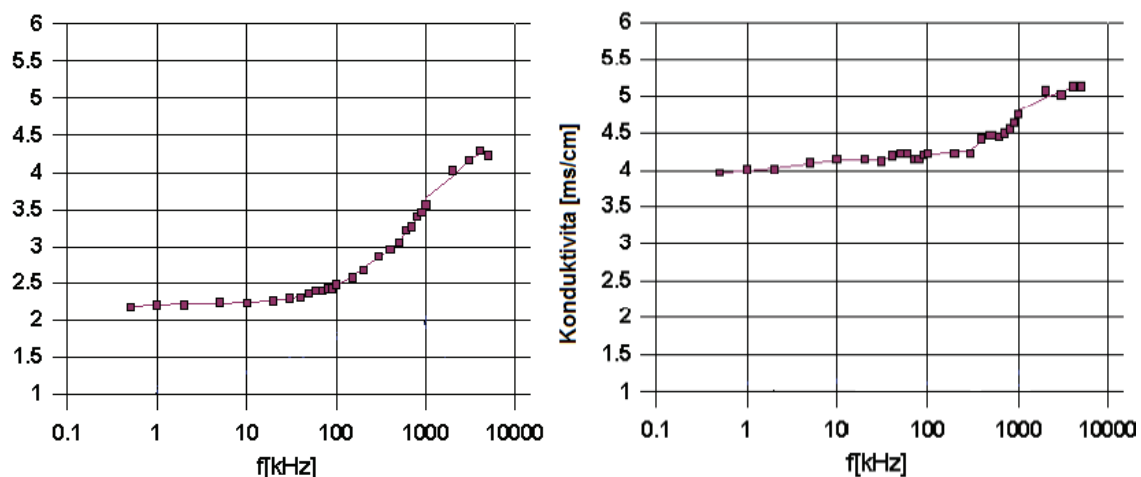
v našem případě tedy vycházel v rozmezí 3,5714 - 3,7736 k $\Omega$ .cm ((k $\Omega$ .cm<sup>2</sup>)/cm). Získali jsme tedy mezní hodnoty odporu materiálu na vzdálenosti 1 cm a ploše 1cm<sup>2</sup>. Abychom mohli získat odpor komory o větších rozměrech, stačí dosadit do vzorce:

$$R = \frac{l}{\sigma S} \quad (5)$$

kde  $R$  je celkový odpor v k $\Omega$ ,  $\sigma$  vyjadřuje vodivost v mS/cm,  $l$  je vzdálenost elektrod

v cm a  $S$  je plocha elektrod v  $\text{cm}^2$ .

Při výpočtu musí být bráno v úvahu, že vodivost materiálu se při elektroporaci zvyšuje. Zvýšení vodivosti je u každé odrůdy jiné, ale v průměru dochází k zdvojnásobení vodivosti na nízkých frekvencích, na vyšších frekvencích řádově MHz se vodivost téměř nemění [12].



Obr. 3.1 : Porovnání vodivostí neošetřeného (vlevo) a PEF ošetřeného vzorku (převzato [12])

Na Obr. 3.1 lze vidět srovnání vodivosti odrůdy Rulandské modré, vlevo pro PEF neošetřený vzorek a vpravo pro vzorek ošetřený energií 35 kJ/kg.

Celková energie dodaná při elektroporaci do materiálu lze snadno vypočítat ze vzorce:

$$W = W_p \cdot n \quad (6)$$

kde  $W_p$  značí energii jednoho pulsu a  $n$  je počet pulsů aplikovaných na materiál.

$$W_p = \int_0^{\tau} p(t) dt \quad (7)$$

kde  $\tau$  je doba trvání pulsu a  $p(t)$  udává výkon v čase.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (8)$$

kde  $u(t)$  udává aktuální hodnotu napětí a  $i(t)$  značí aktuální hodnotu proudu protékajícího médiem. Pokud tedy tyto vztahy dosadíme postupně do (6), získáme celkovou dodanou energii.

$$W = n \int_0^{\tau} u(t) i(t) dt \quad (9)$$

Dodaná energie se jak víme ze zákona o zachování energie, nemůže nikam vytratit, její většina se tedy přemění na teplo. Abychom zjistili, o kolik se ošetřovaný materiál oteplí, musíme znát měrnou tepelnou kapacitu tohoto materiálu. Poté jen dosadíme do vzorce:

$$\Delta t = \frac{W}{mc} \quad (10)$$

v němž  $\Delta t$  značí změnu teploty v °C,  $W$  je dodaná energie  $m$  je hmotnost v kg a  $c$  je měrná tepelná kapacita v kJ/kg.

### 3.3 Výpočet potřebného výkonu zdroje pro impulsy 1000 V

První součástí, kterou musíme při návrhu vypočítat je ochranný předřadný rezistor. Ten se umísťuje před elektrodovou komoru jako ochrana, pro případ že by došlo ke zkratu na elektrodách. Bez použití tohoto rezistoru by došlo při zkratu k neřízenému nárůstu proudu a ke zničení některé z použitých součástek. Nejvíce náchylný v tomto ohledu je spínací tranzistor IGBT, jehož maximální, povolený proud je 25 A. Známe tedy hodnotu maximálního proudu a napětí, s použitím ohmova zákona můžeme tedy dopočítat velikost ochranného odporu.

$$R_o = \frac{1000}{25} = 40\Omega$$

Tato hodnota ovšem není standardní. Pro naši potřebu byl vybrán rezistor nejnižší vyšší z normalizované řady, v tomto případě 47  $\Omega$ .

Odpor ošetřovaného materiálu v elektrodové komoře je vypočítán (5) :

$$R_{MAT} = \frac{1}{0,00028 \cdot 10} \approx 357,14\Omega$$

Podle zadání potřebujeme na elektrodách získat pulsy o amplitudě 1000 V. V tom případě bude proud procházející obvodem roven:

$$I_c = \frac{1000}{357,14} \approx 2,8A$$

V tomto případě je pak úbytek napětí na rezistoru roven:

$$U_o = 2,8 \cdot 47 = 131,6 V$$

Celkové napětí, na které je potřeba nabít kondenzátory je tedy:

$$U_c = U_e + U_o + U_{sp} = 1000 + 131,6 + 8 \approx 1140 V$$

Jak víme z teoretického úvodu, při ošetření materiálu elektroporací dochází v průměru k dvojnásobnému nárůstu vodivosti. Proto musí být proveden výpočet pro novou hodnotu vodivosti.

$$R_{MAT} = \frac{1}{0,00056 \cdot 10} \approx 178,57\Omega$$

$$I_c = \frac{1000}{178,57} \approx 5,6A$$

$$U_o = 5,6 \cdot 47 = 263,2 V$$

$$U_c = U_e + U_o + U_{sp} = 1000 + 263,2 + 8 \approx 1271 V$$

Z hodnot vypočtených pro neošetřený i ošetřený materiál musíme vybrat průměrnou hodnotu, se kterou budeme pokračovat při dalším návrhu.

Průměrná hodnota napětí:  $U_c \approx 1200 \text{ V}$

Průměrná hodnota proudu:  $I_c \approx 4,2 \text{ A}$

Energie jednoho pulsu je podle (7) a (8):

$$W_p = 1200 \cdot 4,2 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cong 0,504 \text{ J (W.s)}$$

Maximální počet pulsů ve shluku je 10, celková energie je tedy podle (6):

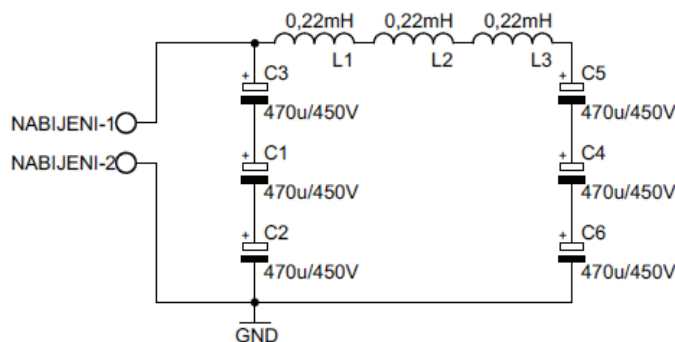
$$W_c = 0,504 \cdot 10 = 5,04 \text{ J}$$

Zvolená doba trvání jednoho shluku je 2 s. Energie je do materiálu dodávána pouze po dobu trvání impulsů, nabíjení v době mezi pulsy by bylo příliš složité, proto je energie do kondenzátorů dodávána pouze v době mezi posledním pulsem jedné periody a prvním pulsem periody další. Tato doba se pohybuje v rozsahu 1,1 – 1,3 s. Proto musíme mít zdroj, který je schopen dodávat alespoň 5 W.

Z uvedeného je tedy patrné, že bude zapotřebí zdroj stejnosměrného napětí 1200 V, 4,2 mA. Jedná se o nejnižší možné, použitelné hodnoty.

### 3.4 Banka kondenzátorů

Celková kapacita banky kondenzátorů bude 300  $\mu\text{F}$ , jedná se o zapojení 2 paralelních větví kondenzátorů každá větev má kapacitu 150  $\mu\text{F}$ . Mezi tyto větve je zapojena tlumivka 0,66 mH, která slouží jako zpožďovací člen, díky němuž je možno generovat pravoúhlé pulsy. Všechny součástky jsou dimenzovány na dostatečné napětí. Každá větev banky kondenzátorů se proto skládá ze tří elektrolytických kondenzátorů, z nichž je každý dimenzován na 450 V. Protože při sériovém řazení kondenzátorů klesá celková kapacita, musí mít každý z kondenzátorů hodnotu 470  $\mu\text{F}$ , při zapojení 3 takovýchto kondenzátorů do série získáme ekvivalentní kondenzátor 153  $\mu\text{F}/1350\text{V}$ . Obdobně postupujeme i u tlumivek, každá je dimenzována na 500 V a její vlastní indukčnost je 0,22 mH. Musí být opět zařazeny tři do série, v tomto případě získáme ekvivalentní tlumivku 0,66mH/1500V, protože hodnoty indukčností se při sériovém řazení sčítají.



Obr. 3.2: Schéma zapojení banky kondenzátorů

Celkové zapojení banky kondenzátorů je vidět na Obr. 3.2.

Před spuštěním elektroporace jsou kondenzátory nabitý na maximální hodnotu. Doba nabíjení se odvíjí od možností použitého zdroje. Při každém pulsu se kondenzátor vybíjí o určitou hodnotu:

$$\begin{aligned}C \cdot U &= t \cdot I && (11) \\300 \cdot 10^{-6} \cdot U &= 100 \cdot 10^{-6} \cdot 4,2 \\U &= 1,4 \text{ V}\end{aligned}$$

Počet pulsů v jednom shluku je 10 a celkový úbytek napětí je tedy 14 V.

Nabíjení je umožněno v době mezi posledním pulsem jednoho shluku a prvním pulsem shluku následujícího, což je 1s.

Jak bylo vypočteno výše, zdroj musí být schopen při napětí 1200 V schopen dodávat proud 4,2 mA. Velikost dobíjecího odporu se vypočte:

$$R_d = \frac{14}{4,2 \cdot 10^{-6}} = 3333,33 \Omega$$

Z normalizované řady byl vybrán rezistor 3,3 kΩ. Při této hodnotě je časová konstanta  $\tau = 3300 \cdot 300 \cdot 10^{-6} = 990 \text{ ms}$ .

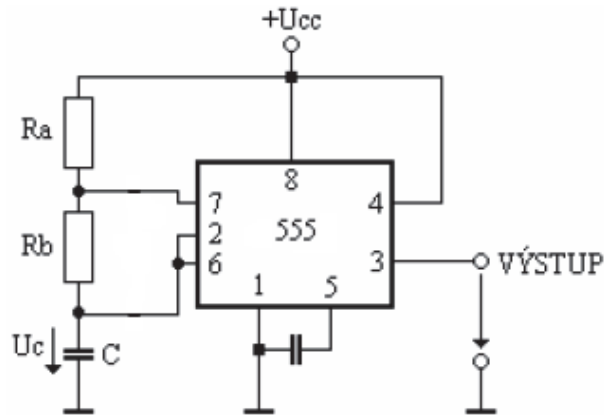
### 3.5 Řídicí obvody

Tyto obvody jsou „srdcem“ celého pracoviště. Jejich úkolem je generovat spouštěcí pulsy pro řízení výkonových tranzistorů. Tyto pulsy musí být generovány s dostatečnou přesností. V našem případě, budou generovat pulsy s periodou 100 ms, o délce 100 μs. Dále musí být generován signál pro ovládání tranzistoru, který řídí nabíjení banky kondenzátorů.

Základem řídicích obvodů je několik časovačů CM555. Obvod 555 obsahuje dva komparátory a jeden klopný obvod na výstupu. Komparační úrovně jsou odvozeny z děliče napětí, který se skládá ze tří 5 kΩ rezistorů. Označení CM udává, že se jedná o CMOS logiku, ta má oproti klasickým NE555 hned několik výhod. Jako je velmi nízká spotřeba, možnost dosahovat vyšších frekvencí (až 2,7 MHz oproti 0,1 MHz u klasických NE555), či velmi vysoká vstupní impedance.

Nejprve je zapotřebí generovat impulsy s periodou 100 ms. Toho docílíme zapojením 555 jako astabilního klopného obvodu (AKO).





Obr. 3.3: Zapojení obvodu 555 jako AKO

Doba, po kterou bude na výstupu logická úroveň 1, se vypočítá ze vztahu:

$$t_1 = 0,693 \cdot (R_A + R_B) \cdot C \quad (12)$$

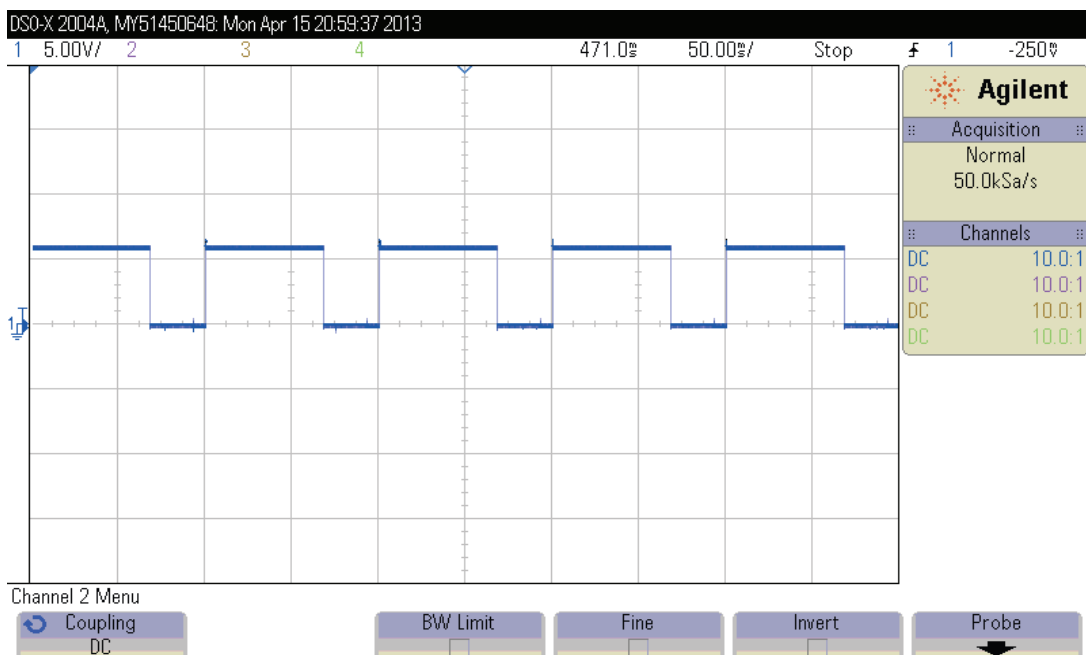
Dobu trvání úrovně 0 zjistíme ze vztahu:

$$t_2 = 0,693 \cdot R_B \cdot C \quad (13)$$

Pro celkovou periodu je tedy dán vztah:

$$T = 0,693 \cdot (R_A + 2 \cdot R_B) \cdot C \quad (14)$$

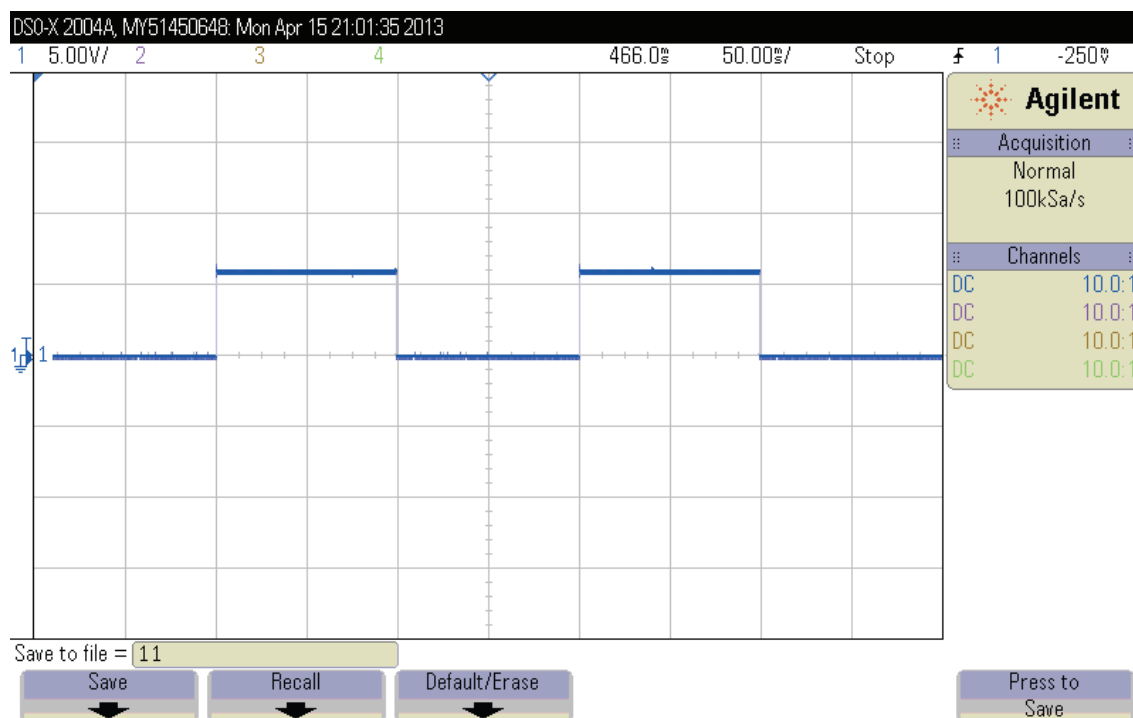
Pro naši potřebu byla hodnota střídý signálu libovolná, důležitá byla celková perioda výstupního signálu jelikož další část, kterou je D-klopný obvod reaguje na náběžnou hranu signálu. Při výpočtu byla vždy nejprve volena hodnota kondenzátoru. Pro hodnotu kondenzátoru  $1 \mu\text{F}$  byly dle vzorce (14) dopočteny velikosti rezistorů  $R_A = 56 \text{ k}\Omega$  a  $R_B = 39 \text{ k}\Omega$ .



Obr. 3.4: Průběh signálu generovaného prvním časovačem

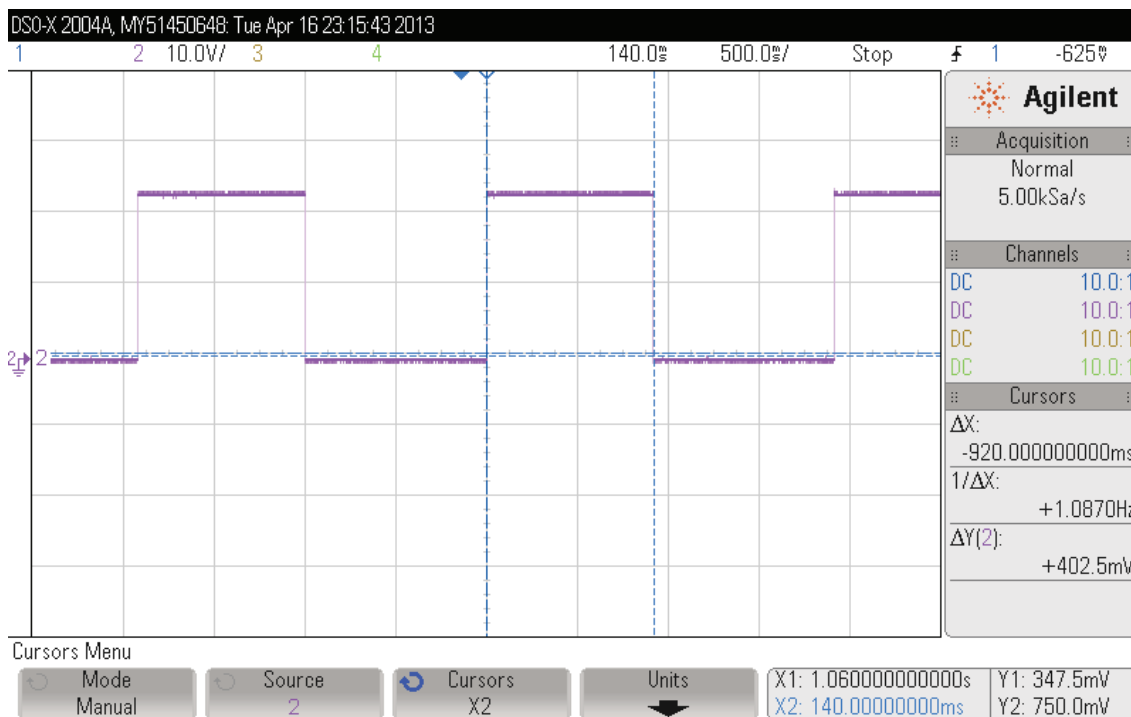
Na Obr. 3.4 je vidět průběh signálu za prvním časovačem, který slouží ke generování časového signálu 100 ms. Jak je vidět rastr osciloskopu byl nastaven 50 ms na dílek, doba trvání jedné periody jsou 2 dílky, což odpovídá 100 ms. Dostatečné přesnosti bylo dosaženo použitím součástek s velmi malými tolerancemi, u kondenzátorů 5% a u rezistorů 0,1 či 1% dle dostupnosti.

Abychom na elektrodách získali bipolární impulzy, je nutné výkonové tranzistory zapojit jako křížový spínač. Pro jeho ovládání je nutné oddělit sudé a liché impulzy. Liché impulzy budou generovat kladné pulsy a sudé budou generovat záporné pulsy. Pro rozdělení sudých a lichých impulsů bylo použito D-klopného obvodu, který byl využit jako dělička dvěma. Z přímého výstupu byly brány liché a z negovaného sudé řídicí pulsy. Tyto výstupní pulsy mají periodu 200 ms, viz Obr. 3.5 (zobrazeny pulsy pouze z přímého výstupu), liché a sudé jsou vůči sobě posunuty o 100 ms.



Obr. 3.5: Průběh signálu na přímém výstupu klopného obvodu

Pro spínání tranzistorů ovládajícího dobíjení kondenzátorů bylo zapotřebí generovat signál s periodou 2 sekundy, přičemž střída by měla být cca v rozsahu 45:55 až 50:50. Bylo opět využito časovače 555, hodnota kondenzátoru byla zvolena 10  $\mu\text{F}$ , hodnoty  $R_A$  a  $R_B$  byly dopočteny ze vztahů (12) až (14),  $R_A = 27 \text{ k}\Omega$  a  $R_B = 130 \text{ k}\Omega$ . Jak je patrné z Obr. 3.6 byl generován průběh periodou 1,92 s, přičemž doba sepnutí byla 0,92 s a zbylou sekundu byl tranzistor rozepnut. Tento průběh plně vyhovuje požadavkům, protože 10 pulsů po 100 ms odpovídá době trvání 0,9 s. A podle výpočtu pro dobíjení kondenzátorů stačí 1 sekunda k opětovnému dobití banky kondenzátorů.

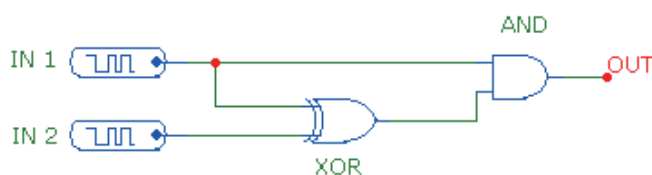


Obr. 3.6: Signál pro řízení nabíjení

V době dobíjení banky kondenzátorů, musí být zakázáno spínání křížového spínače. Pravdivostní tabulka výstupní funkce je zobrazena viz Tab. 1. Toho bylo docíleno pomocí kombinace logických obvodů XOR a AND. Tyto členy musí být vzájemně propojeny podle Obr. 3.7.

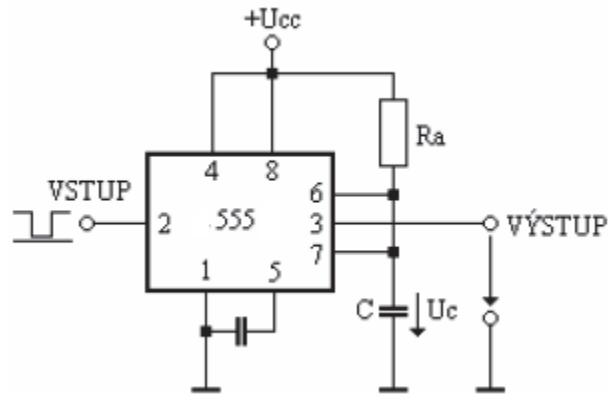
Tab. 3.2: Požadovaná pravdivostní tabulka

IN 1	IN 2	OUT
0	0	0
1	0	1
0	1	0
1	1	0



Obr. 3.7: Propojení logických členů

Výstupem logických členů bylo řízeno spínání monostabilních klopných obvodů (dále jen MKO), které udávají délku trvání impulsu. Jako MKO byl použit opět obvod časovače 555 v zapojení dle Obr. 3.8.

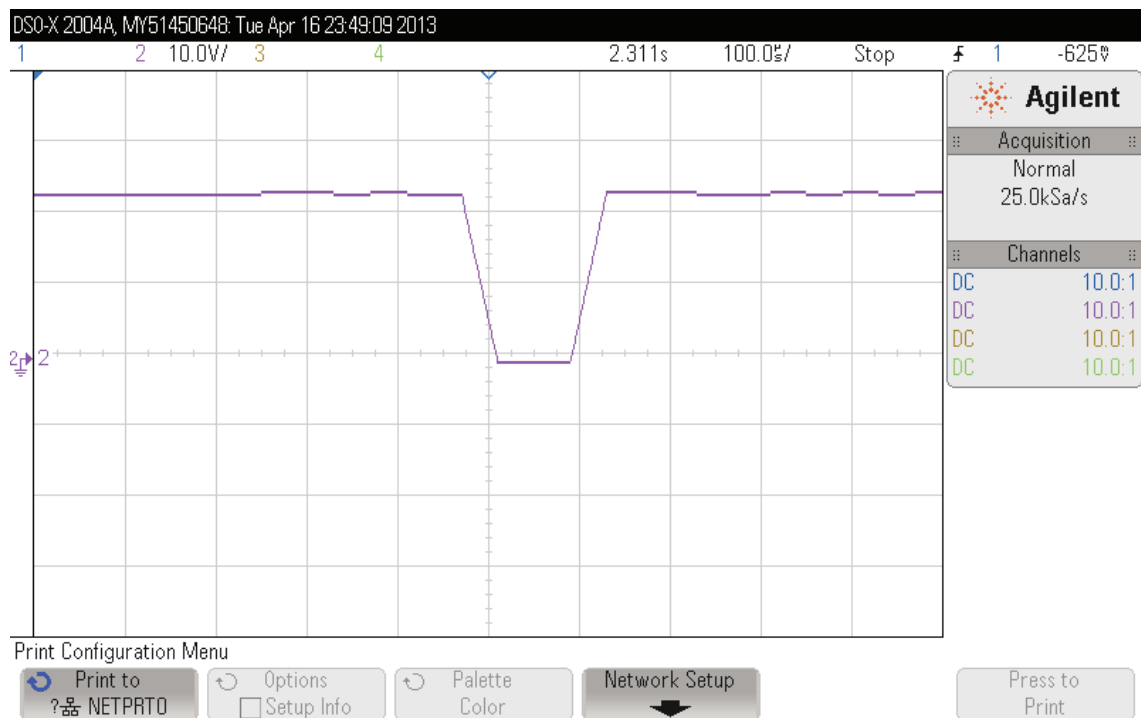


Obr. 3.8: Zapojení obvodu 555 jako MKO

Doba délky kyvu MKO se dá vypočítat ze vztahu:

$$t = 1,1.R.C \quad (15)$$

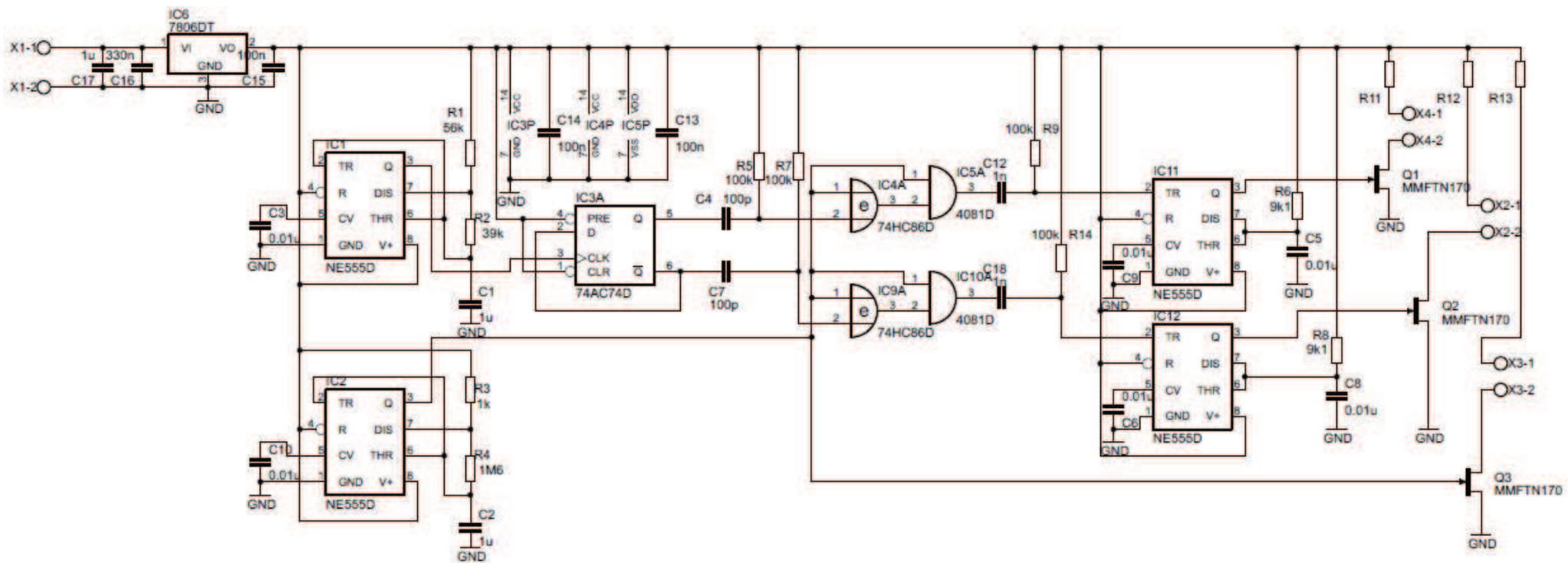
V našem případě byla požadovaná doba kyvu  $100 \mu\text{s}$ , a bylo zapotřebí dopočítat hodnoty pasivních součástí. Hodnota kondenzátoru byla opět zvolena,  $C = 10 \text{ nF}$  a k ní dopočtená hodnota rezistoru byla  $R = 9,1 \text{ k}\Omega$ . Na Obr. 3.9 je vidět průběh signálu změřeného na výstupu.



Obr. 3.9: Délka pulsu  $100 \mu\text{s}$

Výstupy z MKO jsou vyvedeny na řídicí elektrody tranzistorů MMFTN170, které jsou zapojeny jako tranzistory s otevřeným kolektorem, jimiž jsou ovládány optočleny, sloužící ke galvanickému oddělení řídicí desky a desky spínacích tranzistorů.

Schéma celého zapojení je vidět na Obr. 3.10.



Obr. 3.10: Schéma obvodů řídicí desky

### 3.6 Výkonové, spínací obvody

Mají za úkol ovládat nabíjení banky kondenzátorů a spínat výkon do zátěže.

Jelikož pracují s velkými napětími a proudy musí být použité tranzistory řádně dimenzovány, co se týče maximálního povoleného proudu, tak i závěrného napětí  $U_{CE}$ . Další důležitou vlastností je rychlost spínání a rozepínání těchto tranzistorů, která by se měla pohybovat v řádek stovek nanosekund až maximálně jednotek mikrosekund. Je zde také snaha o minimalizaci napětí  $U_{CE}$  v propustném směru, čímž dojde ke snížení ztrátového výkonu tranzistoru. Pro tyto účely se hodí nejlépe tranzistory typu IGBT, což jsou bipolární tranzistory s izolovaným hradlem. Kombinují v sobě výhody unipolárních a bipolárních tranzistorů. Čip tranzistoru má izolované hradlo a na straně kolektoru vytvořen PN přechod, injektující minoritní nosiče do kanálu, ve chvíli kdy je IGBT tranzistor sepnut.[21] Což výrazně snižuje úbytek napětí na přechodu  $U_{CE}$  v sepnutém stavu. V našem případě byly zvoleny tranzistory od společnosti IXYS typ IXBH9N160G. Které splňují všechny dříve uvedené parametry. Špičkový proud, který je těmito tranzistory možno spínat je 10 A v pulsním režimu, závěrné napětí dosahuje hodnoty 1600 V,  $U_{CE}$  v propustném směru je 4,9 V a doby sepnutí a rozepnutí tranzistoru se pohybují v rozpětí stovek ns [15].

Spínání výkonových tranzistorů IGBT má několik úskalí. Tyto tranzistory sice umožňují spínání velkých proudů a napětí při vysokých frekvencích, ovšem jejich budiče musí být schopny dostatečně rychlého nabíjení a vybíjení jejich tzv. Millerovy kapacity. Což je kapacita mezi gatem a drainem tranzistoru. U těchto typů tranzistorů může dosahovat několika stovek pF až jednotek nF.

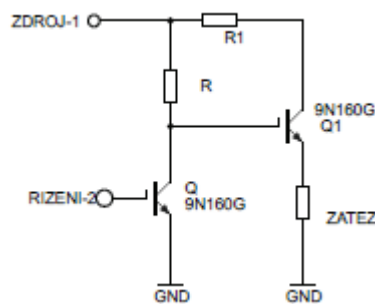
Je několik možností jak tyto budiče realizovat. Jednou variantou je varianta analogová. V tomto případě jsou tranzistory řízeny pomocnými obvody. Jelikož jsou IGBT tranzistory většinou řízeny napětími v rozsahu 20-30 V, nemusí být tranzistory pomocných spínacích obvodů dimenzovány na příliš vysoké napětí, ovšem je nutné, aby dokázaly pracovat s velkými proudy, které obvodem prochází právě v době spínání a rozepínání IGBT tranzistorů. Těto metody je využíváno spíše pro řízení menších IGBT jednotek.

Druhou možností je použití tzv. IGBT driverů. Jedná se o speciální integrované obvody, které jsou přímo navrženy a optimalizovány pro řízení IGBT jednotek. Některé IGBT jednotky mají již v sobě tento driver zabudován. V posledních letech se portfolio těchto driverů značně rozrůstá a pro vývojáře tato oblast znamená velkou výzvu. Velkou výhodou těchto součástek je to, že odpadá návrh pomocných obvodů. Tyto součástky jsou navrženy tak, že na jejich vývody je přivedeno pouze požadované napájení a řídicí impulsy a součástka se o zbytek postará sama. Některé typy mají řídicí vstupy digitální a jsou přímo uzpůsobeny pro řízení mikrokontrolery. Největší nevýhodou těchto součástek je v současnosti jejich vysoká cena. Z tohoto důvodu se používají většinou pro řízení větších IGBT prvků (pro spínání stovek A). Další nevýhodou při použití jednotek s integrovaným řízením je fakt, že může nastat porucha buď pouze budičí

části, nebo naopak pouze části výkonové, v obou případech je ovšem nutné vyměnit celou součástku.

Jelikož v této práci je pracováno s menšími IGBT jednotkami, je využito první z obou zmíněných variant. Varianta druhá by sice celou práci značně zjednodušila, ale také prodražila. Jelikož je zapotřebí 10 výkonových IGBT tranzistorů bylo by zapotřebí stejné množství IGBT driverů, což by při ceně cca 40-50 dolarů za kus cenu celého výrobku zněkolikanásobilo.

Samotné spínací obvody se skládají z několika částí. První ovládá nabíjení banky kondenzátorů. Ty musejí být před procesem elektroporace dobity na maximální úroveň a v jejím průběhu se musejí dobíjet pouze v době pauzy mezi jednotlivými shluky impulsů. Pokud by docházelo k dobíjení také v době shluků impulsů, docházelo by k přílišnému namáhání zdroje, který by se v době pulsu vždy na krátkou chvíli dostával do zkratu.

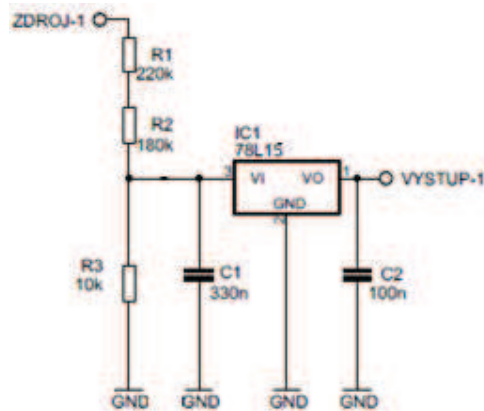


Obr. 3.11: Zapojení ovládání nabíjení banky kondenzátorů

Zapojení odpovídá Obr. 3.11. Tranzistor Q je řízen impulsy přes optočlen z řídicího obvodu. Jakmile přijde ovládací impuls, tranzistor sepne, čímž se uzemní gate tranzistoru Q1 a ten se rozezne. Tím přestane proudit energie do zátěže, která je v našem případě tvořena předřadnými rezistory a bankou kondenzátorů. Velikost rezistoru R musí být zvolena s ohledem na to, že i při rozepnutém tranzistoru Q jím teče zbytkový proud až 100  $\mu\text{A}$  a ten způsobuje na rezistoru R úbytek napětí. Pokud by byl rezistor R příliš velký, napětí na gatu tranzistoru Q1 by příliš pokleslo, čímž by pokleslo i napětí na emitoru tranzistoru (na zátěži), při stejné velikosti napětí na kolektoru, tím by vzrostlo napětí mezi kolektorem a emitorem a došlo by k průrazu tranzistoru. Pokud by byl rezistor R naopak příliš malý, docházelo by v případě sepnutí tranzistoru Q k neúměrnému nárůstu procházejícího proudu a zatěžování zdroje i spínacího tranzistoru. V našem případě byl tedy volen kompromis a velikost odporu R byla zvolena 100 k $\Omega$ . Při této velikosti na něm dochází při rozepnutém tranzistoru Q k maximálnímu úbytku napětí 10 V a v případě sepnutí tranzistoru Q je na něm ztráta cca 10 W. Rezistor R<sub>1</sub> má velikost 2,5 k $\Omega$  a slouží ke snižování napětí na kolektoru, aby nedocházelo k problému s příliš velkým úbytkem  $U_{\text{CE}}$  a následnému poškození tranzistoru Q1 jak již bylo popsáno výše.

Další částí spínací desky je stabilizátor, který slouží k získávání ovládacího napětí pro řídicí tranzistory. Pro jejich řízení je vhodné použít napětí  $U_{\text{GE}}$  o velikosti v rozmezí

10-20 V. Čím vyšší je ovšem napětí tím kratší je i doba otevírání tranzistoru, proto byla zvolena velikost řídicího napětí 15 V. Toto napětí je získáváno ze zdroje pomocí děliče napětí, získáme napětí cca 30 V a z něj získáme požadovaných 15 V díky stabilizátoru. Zapojení můžeme vidět na Obr. 3.12.



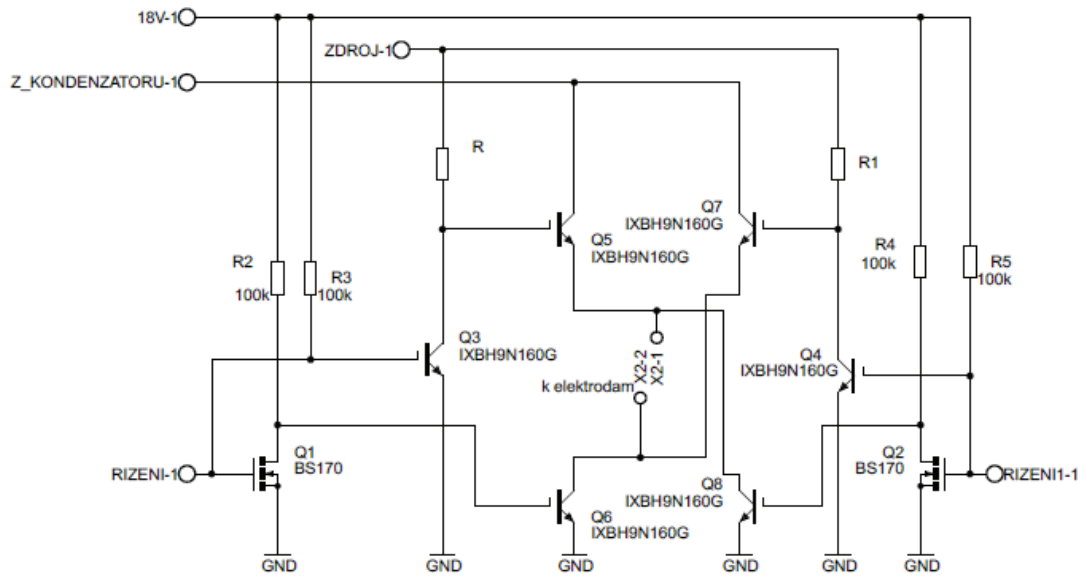
Obr. 3.12: Zapojení stabilizátoru pro získání řídicího napětí

Rezistory  $R_1$ ,  $R_2$  a  $R_3$  slouží jako dělič napětí, ze kterého je získáno napětí pro stabilizátor. Kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  jsou dány doporučeným zapojením dle katalogového listu. Brání rozkmitání stabilizátoru.

Poslední a nejdůležitější částí spínací desky je obvod křížového spínače, který slouží k vytváření samotných elektroporačních pulsů. Pokud by nebylo zapotřebí generovat bipolární impulsy, stačil by pouze klasický spínač, čímž by se ulehčilo i řízení. V tomto případě však je zapotřebí křížového přepínače a oddělení lichých a sudých řídicích pulsů, které bylo zařízení již na řídicí desce.

Zapojení křížového spínače můžeme vidět na Obr. 3.13. Hlavní část tvoří šestice výkonových tranzistorů 9N160G. Tranzistory  $Q_3$ ,  $Q_4$ ,  $Q_5$  a  $Q_7$  tvoří dva nezávislé spínače, viz Obr. 3.11. Tranzistory  $Q_6$  a  $Q_8$  jsou zapojeny jako tranzistory se společným emitorem. Každý spínač je řízen vždy společně s jedním tranzistorem, aby došlo k úplnému spojení obvodu. Přes optočleny z řídicí desky jsou spínány tranzistory  $Q_1$  a  $Q_2$ , kterými jsou dále ovládány výkonové tranzistory. V každém časovém okamžiku může být otevřena pouze jedna větev křížového spínače, nikdy nesmí dojít k tomu, že

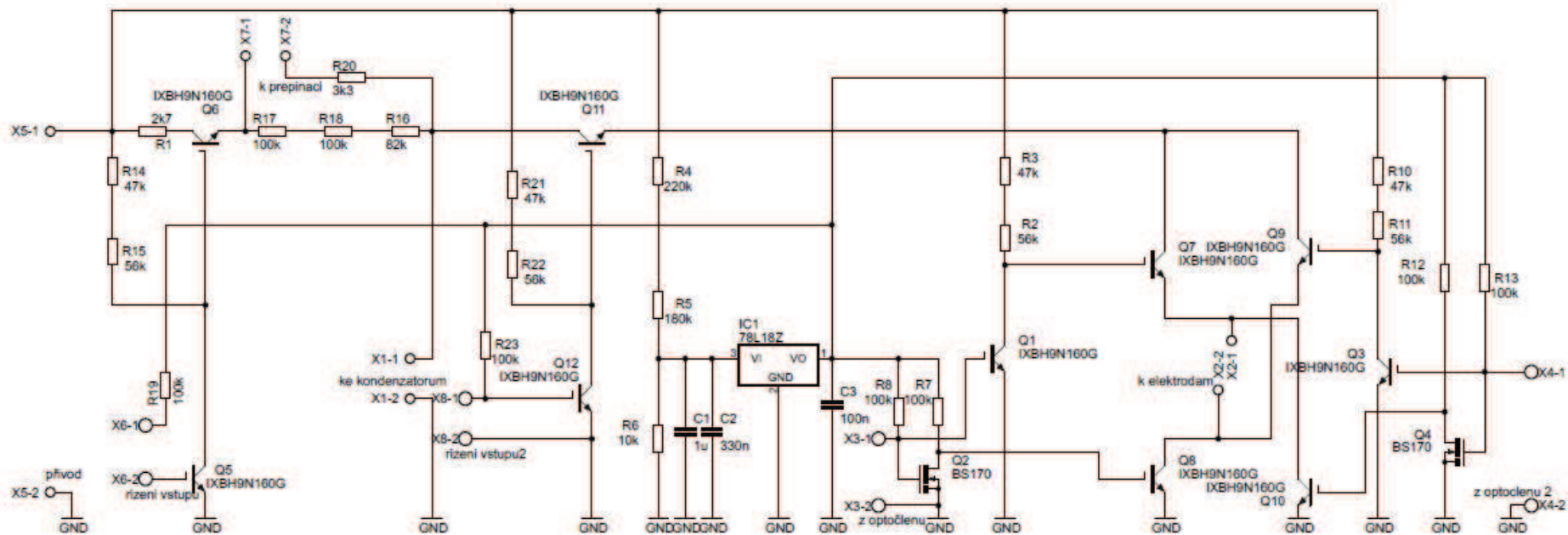




Obr. 3.13: Schéma zapojení křížového spínače

by byly otevřeny obě větve současně. V takovém případě by došlo ke zkratu a nenávratnému poškození výkonových tranzistorů  $Q_5$ ,  $Q_6$ ,  $Q_7$  a  $Q_8$ . Rezistory  $R_2$ - $R_5$  jsou zvoleny  $100\text{ k}\Omega$ , aby nedocházelo ke zbytečnému proudovému namáhání stabilizátoru.

Celkové schéma zapojení výkonové desky je vidět na Obr. 3.14. Tranzistory  $Q_5$  a  $Q_{12}$  jsou řízeny stejnými pulsy, ovšem jejich zapojení způsobí, že jsou otevřeny vždy inverzně, v každou chvíli pouze jeden nebo druhý.



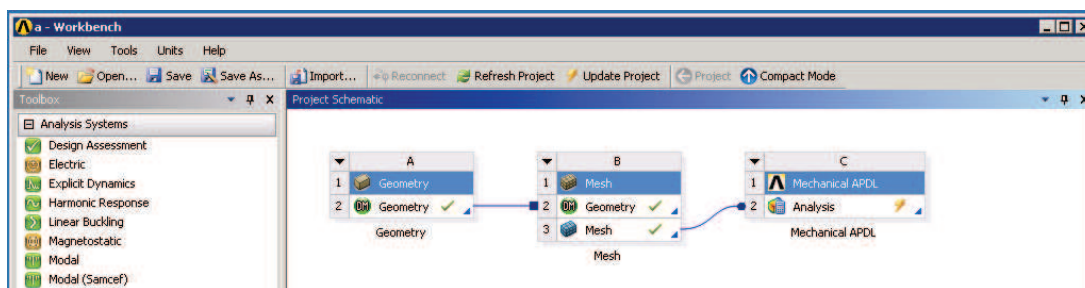
Obr. 3.14: Schéma výkonové desky

## 4 SIMULACE

### 4.1 Simulace elektrického pole v programu ANSYS

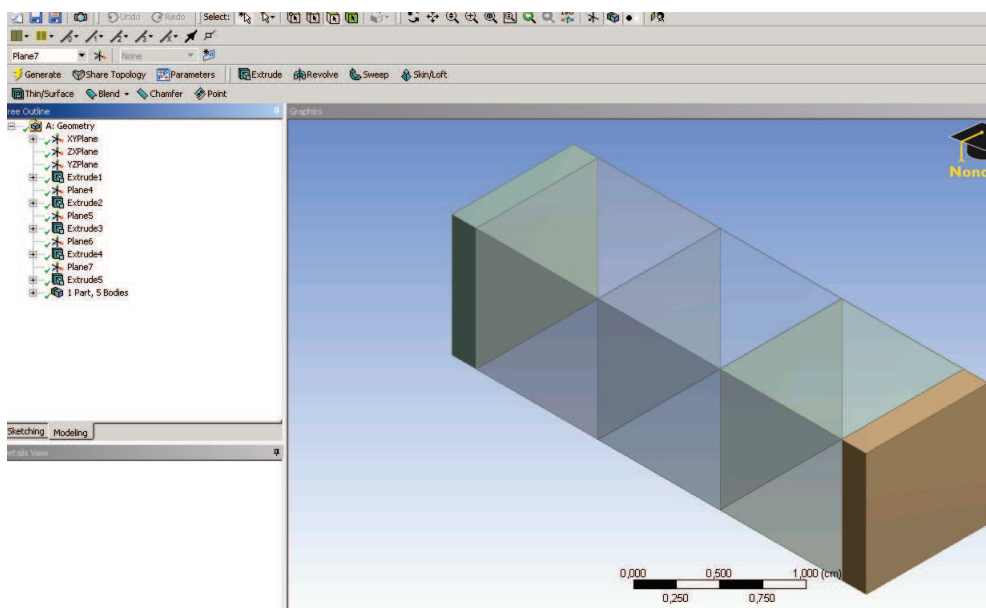
Pro modelování elektrického pole byl využit simulační program ANSYS. Jedná se o program umožňující termodynamickou analýzu, analýzu proudění kontinua, analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí, akustické analýzy a mnohé další. Pro naši potřebu si vystačíme s modulem pro analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí [3],[4].

Nejprve bylo zapotřebí vytvořit projekt. Pro naši analýzu jsou do projektu vloženy bloky Geometry, Mesh a Mechanical APDL. Dále došlo k jejich uspořádání a pospojování viz Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Jednotlivé bloky projektu

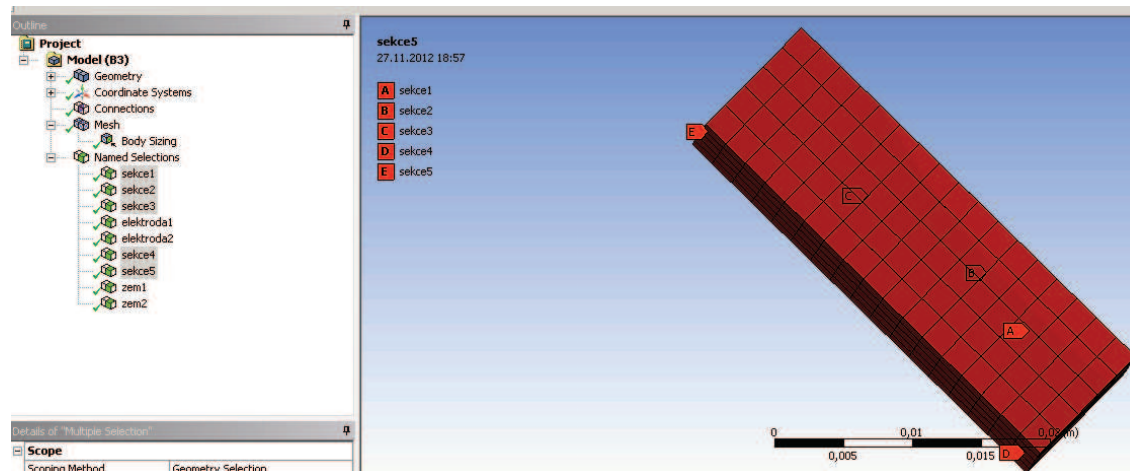
Pro simulaci byla zvolena obdélníková elektrodová komora s paralelním uspořádáním elektrod. Plocha elektrod byla zvolena  $1 \text{ cm}^2$  a vzdálenost elektrod od sebe je  $1 \text{ cm}$ . Tyto rozměry byly zvoleny pro názornost.



Obr. 4.2: Geometrický model simulovaného prostoru

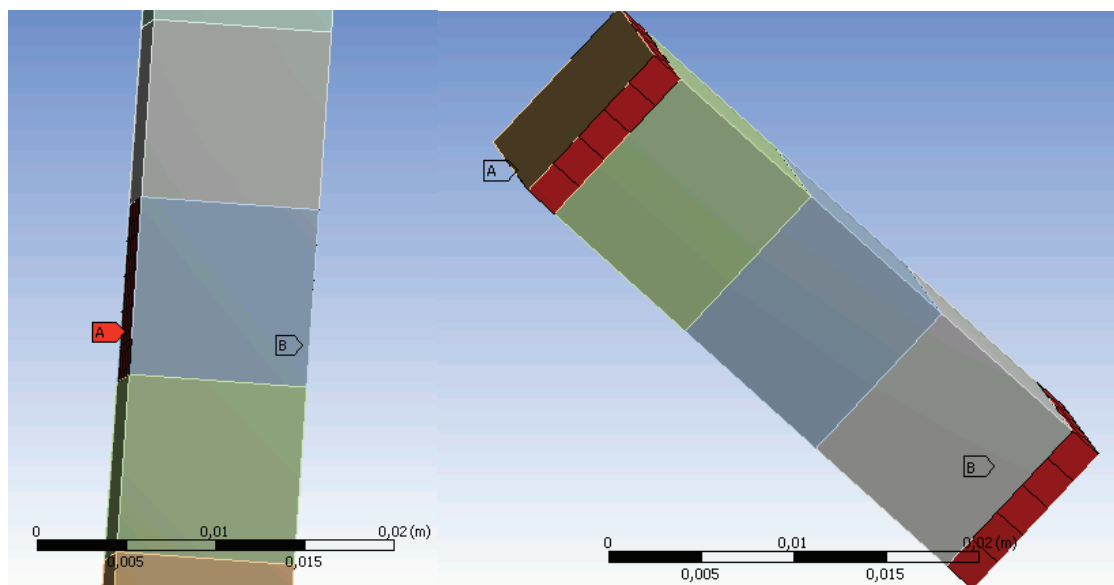
Geometrický model Obr. 4.2, byl vytvářen v design modeleru, se skládá z pěti částí, které tvoří jeden celek.

Dalším krokem bylo vytvoření výpočtových sítí, přes celý model Obr. 4.3. To bylo provedeno v bloku Mesh hlavního okna projektu.



Obr. 4.3: Pokrytí modelu výpočtovou sítí

V tomto bloku byly dále specifikovány plochy elektrod a také ochranné zemnicí prstence Obr. 4.4. Elektrody byly situovány na dvě protilehlé strany ve střední části modelu. Zemnicí prstence jsou umístěny na okraje celého modelu.



Obr. 4.4: Umístění elektrod A, B (vlevo) a umístění zemnicích prstenců A, B (vpravo)

Samotnou analýzu spustíme opět z hlavního okna projektu pomocí Analysis – Edit in Mechanical APLD. V tomto bloku se nastavují jednotlivé parametry analýzy a její požadované výstupy. Veškerá práce s programem probíhá přes textové příkazové rozhraní. Kdy nejprve byly definovány konstanty jako jsou hodnoty napětí na elektrodách a hodnotu relativní permitivity  $\epsilon_r$  použitého materiálu [3]:

```
U1 = 1000
U2 = 0
epsr = 80
```

V dalším kroku se přepneme do preprocesoru.

```
/prep7
```

V něm byly definovány prvky a to tak, že každé části, v našem případě všem pěti blokům byl přiřazen prvek SOLID122 [3], který umožní řešit elektrostatickou úlohu. Dále se v preprocesoru byla nastavena permitivita simulovaného materiálu, v tomto případě je použitým materiálem mošt, a proto byla nastavená hodnota permitivity pro všechny části stejná (v ukázce je předvedeno nastavení pouze jednoho bloku, obdobně byly nastaveny také všechny ostatní bloky).

```
et,1,SOLID122
mp,perx,1,epsr
FINISH
```

Po nastavení vlastností materiálů, se přepneme do menu Solution.

```
/SOL
```

V tomto menu byly nastaveny parametry samotné simulace. Elektrodám a zemnicím prstencům byly přiřazeny příslušné potenciály,

```
d,elektroda1,volt,U1
d,elektroda2,volt,U2
d,zem1,volt,U2
d,zem2,volt,U2
```

a následně byl spuštěn výpočet.

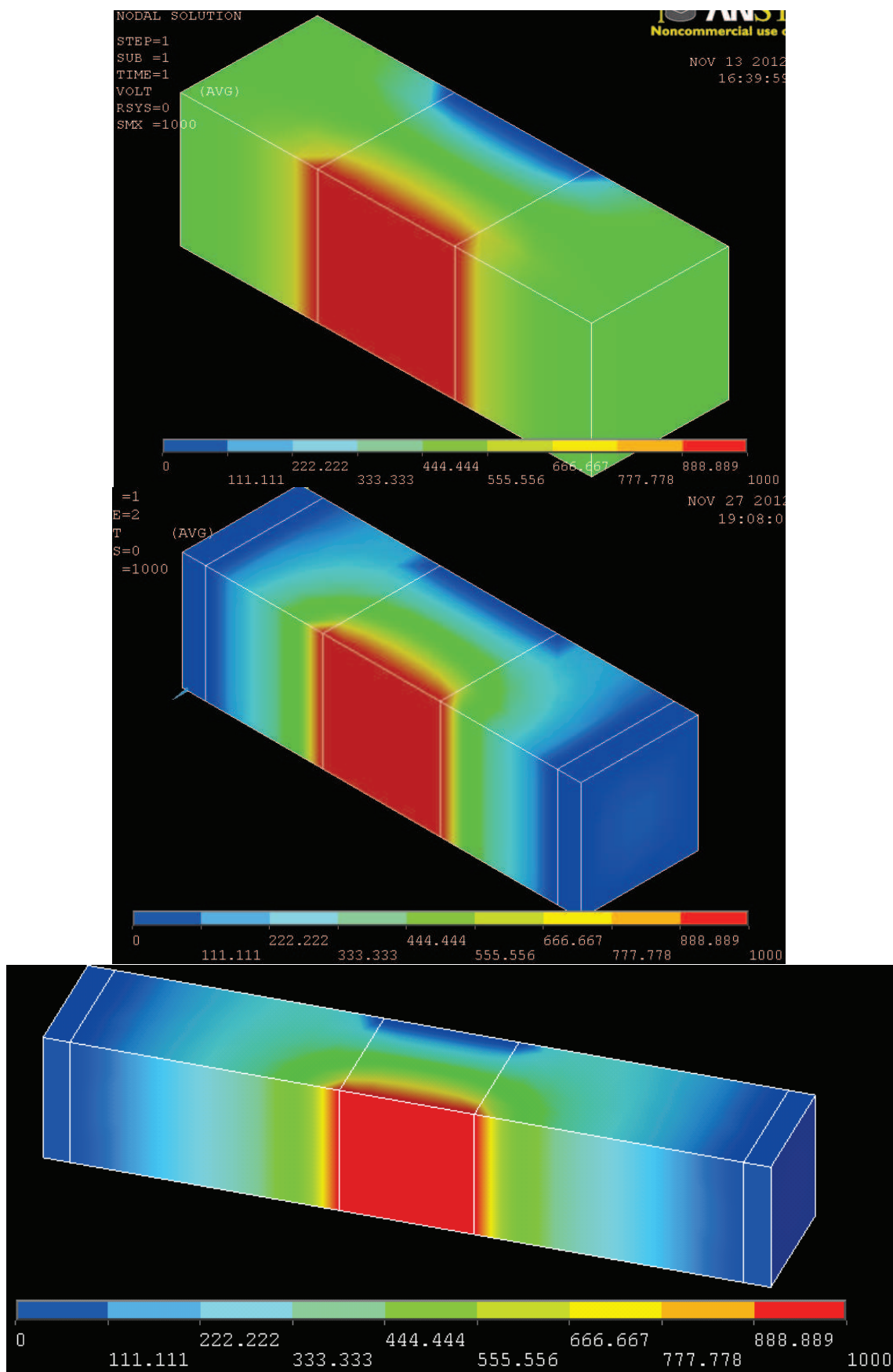
```
solve
FINISH
```

Abychom mohli pracovat s výsledky simulace je vhodné si je nejprve uložit. To se děje v menu Postprocessor.

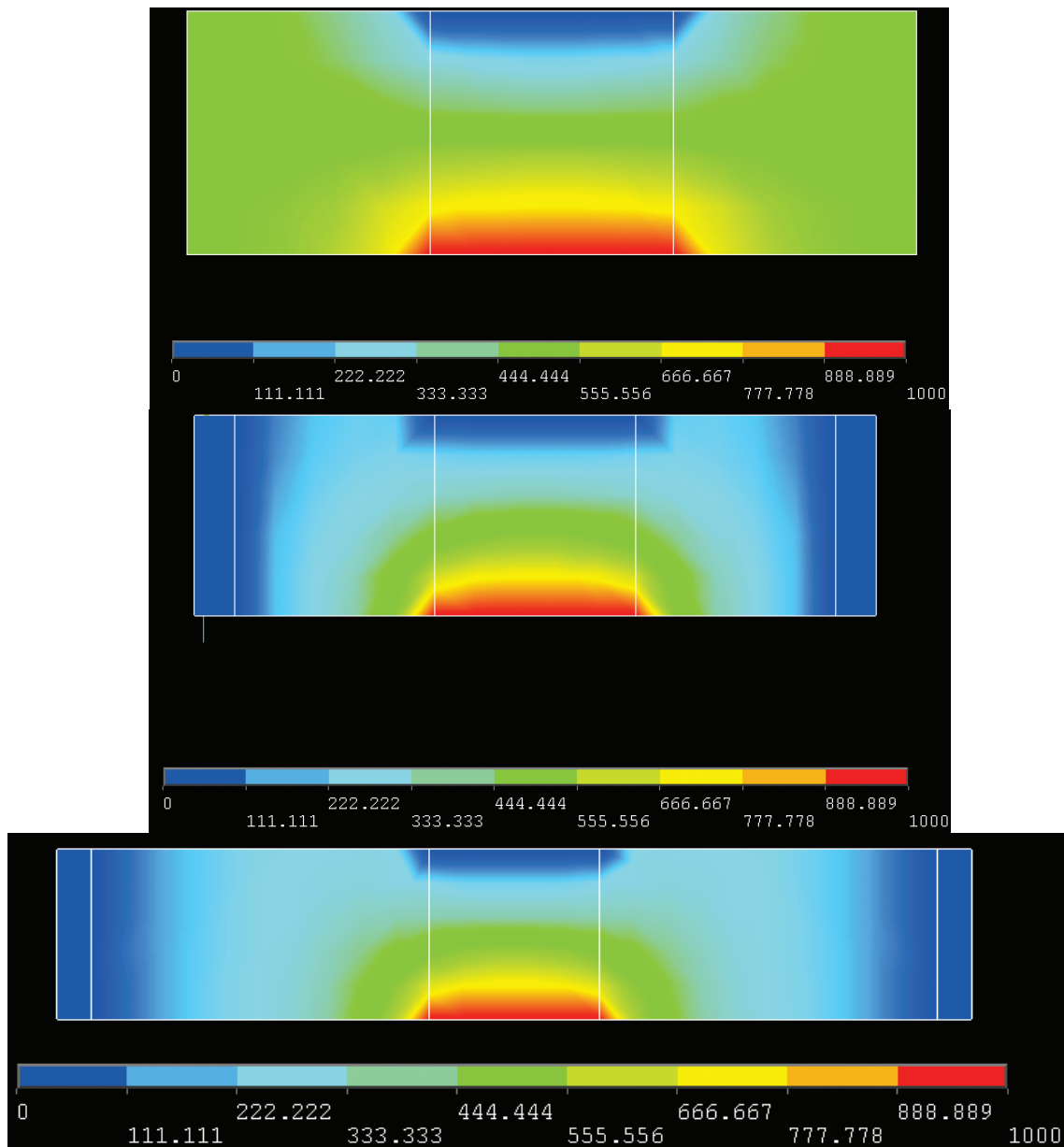
```
/POST1
file,'Elektrostatika','rth','.'
set,last
```

Pro vykreslení grafu rozložení elektrického potenciálu slouží příkaz:

```
plnsol,volt
```



Obr. 4.5: Graf rozložení elektrického potenciálu 3D (bez zemnicích prstenců, zemnicí prstence ve vzdálenosti 1 cm a zemnicí prstence ve vzdálenosti 2 cm)



Obr. 4.6: Graf rozložení elektrického potenciálu 2D (bez zemnicích prstenců, zemnicí prstence ve vzdálenosti 1cm a zemnicí prstence ve vzdálenosti 2 cm)

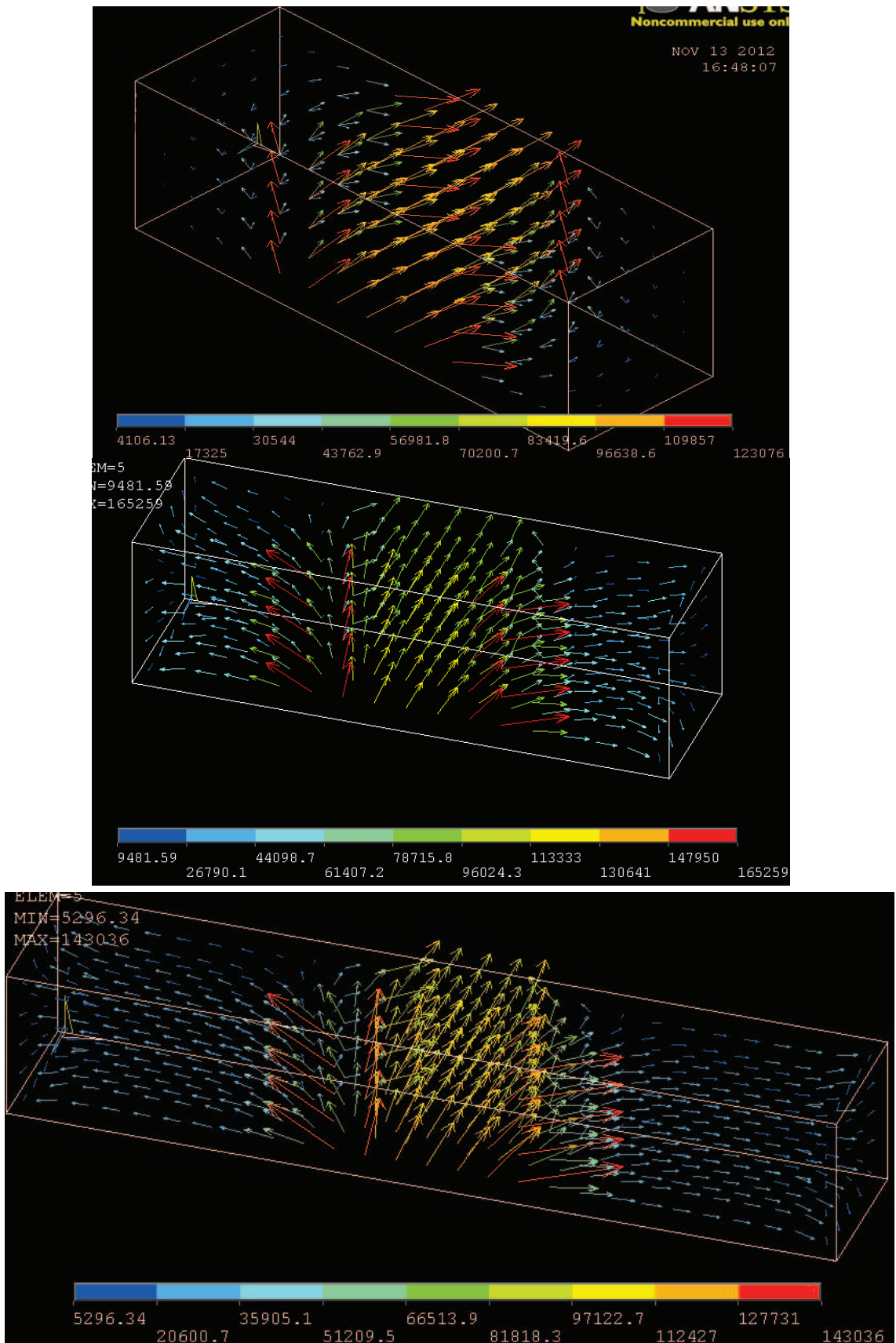
Dalšími veličinami, které je vhodné si zobrazit, jsou intenzity elektrického pole a elektrické indukce. Jedná se o směrové veličiny, a proto je vhodné si zobrazit jejich vektorový graf [4].

```
plvect,ef, , , ,vect,elem,on,0
plvect,d, , , ,vect,elem,on,0
```

Obr. 4.7 a 4.8 ukazují intenzitu elektrického pole. Grafy elektrické indukce zde nebudou zobrazeny, protože jsou totožné s grafy intenzity el. pole, liší se pouze svoji velikostí, elektrická indukce se vypočítá:

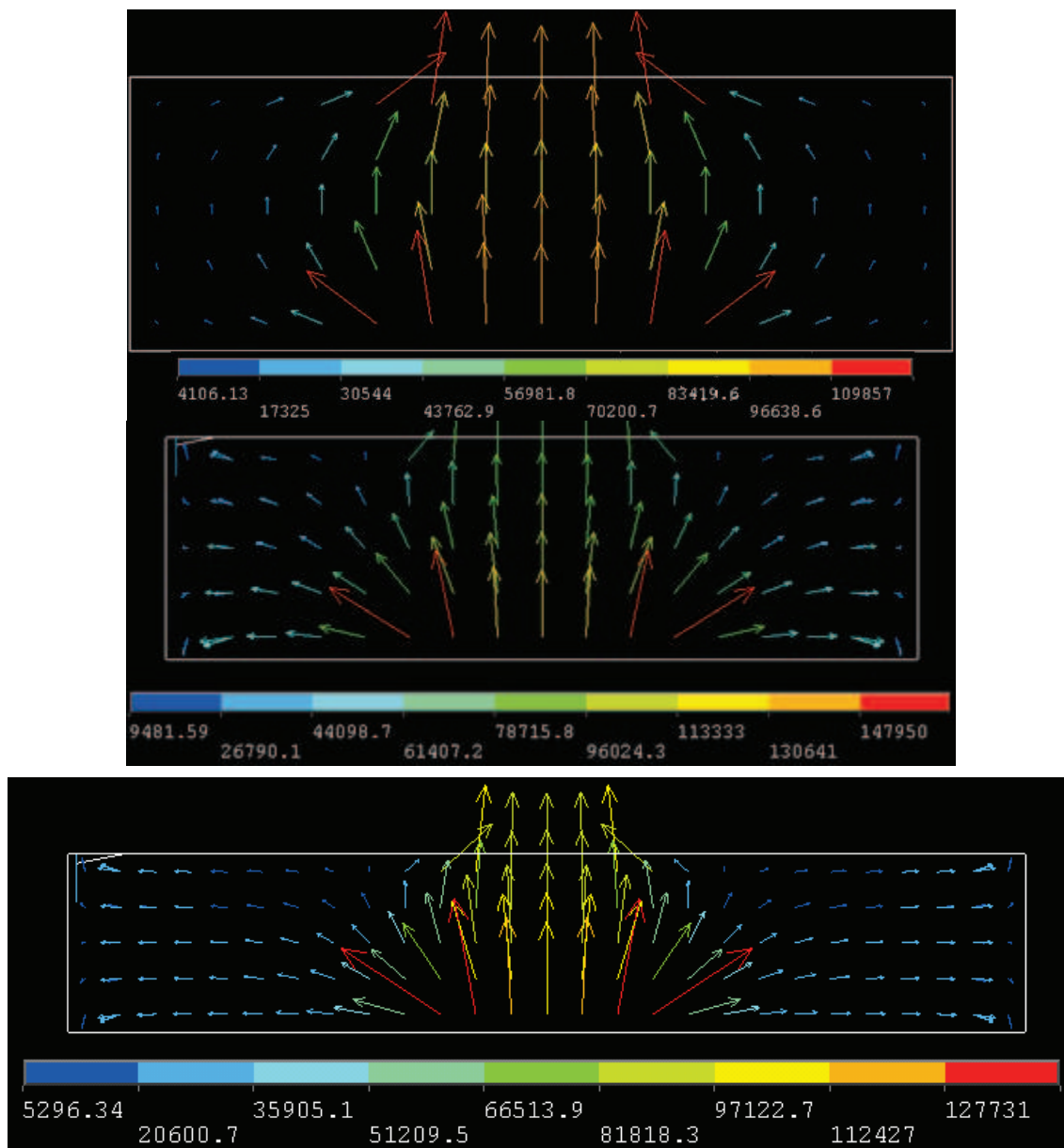
$$D = E \cdot \epsilon \cdot \epsilon_r \quad (16)$$





Obr. 4.7: Graf intenzity elektrického pole 3D (bez zemnicích prstenců, zemnicí prstence ve vzdálenosti 1cm a zemnicí prstence ve vzdálenosti 2 cm)





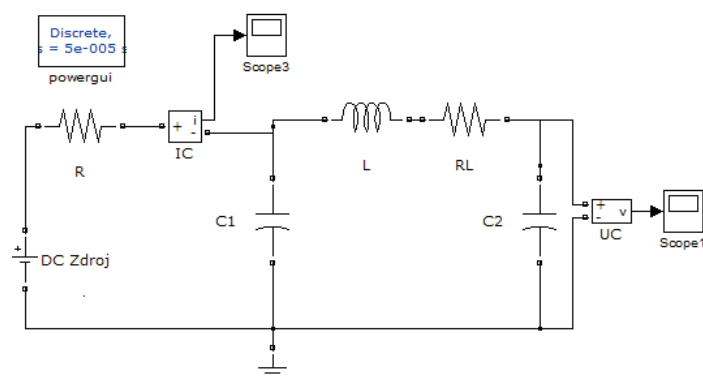
Obr. 4.8: Graf intenzity elektrického pole 2D (bez zemnicích prstenců, zemnicí prstence ve vzdálenosti 1 cm a zemnicí prstence ve vzdálenosti 2 cm)

Intenzita elektrického pole je vyjádřena v jednotkách N/C, abychom dostali výsledek ve V/cm musíme vypočtenou hodnotu vydělit ještě 100.

## 4.2 Simulace chování obvodu

Pro simulaci chování obvodu bylo zvoleno simulační prostředí Simulink programu Matlab. Jedná se o nadstavbu pro simulaci a modelování dynamických systémů, která umožňuje vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic [18].

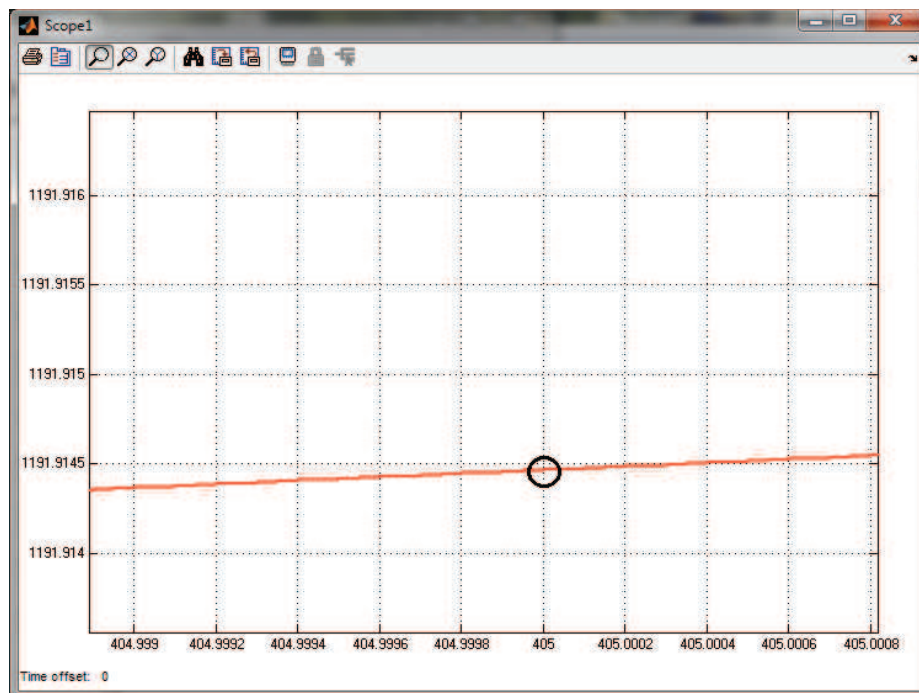
Simulace byla prováděna po částech. Nejprve byl nasimulován obvod, na kterém je vidět průběh nabíjení kondenzátoru. Hlavním cílem bylo potvrdit si vypočtené hodnoty doby nabíjení banky kondenzátorů.



Obr. 4.9: Schéma obvodu pro simulaci nabíjení banky kondenzátorů

Hodnota  $R$  byla zvolena dle výkonových možností zdroje na  $270 \text{ k}\Omega$ . Kapacity kondenzátorů byly zvoleny  $C_1$  a  $C_2$   $150 \mu\text{F}$  (jedná se o 3 sériově řazené kondenzátory  $470 \mu\text{F}$ ), celková kapacita je tedy  $300 \mu\text{F}$ . Hodnota  $L$  je  $0,66 \text{ mH}$  (jedná se o 3 sériově řazené tlumivky  $0,22 \text{ mH}$ ) a odpor cívky  $R_L = 0,014 \Omega$ .

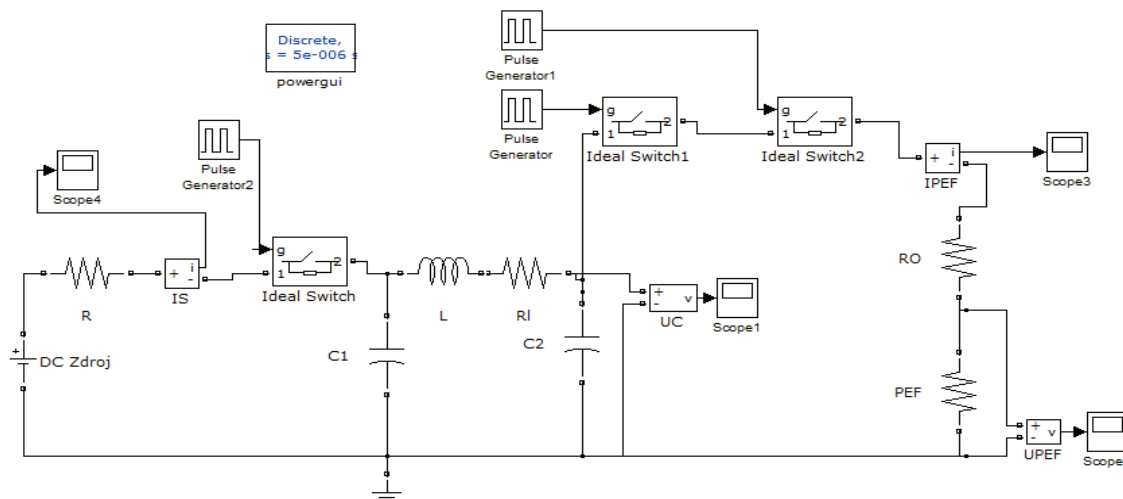
Časová konstanta  $\tau = 270 \cdot 10^3 \cdot 300 \cdot 10^{-6} = 81 \text{ s}$ , protože hodnota sériového odporu cívky je zanedbatelná vzhledem k hodnotě odporu nabíjecího kondenzátoru  $R$ , je při výpočtu zanedbána. Jak bylo uvedeno výše, aby byl kondenzátor nabit na 99,3% je zapotřebí doby  $5\tau$ . Za tuto dobu by tedy napětí na bance kondenzátorů mělo být rovno  $1191,6 \text{ V}$ . Ze simulace lze vyčíst, že v době  $405 \text{ s}$  což odpovídá době  $5\tau$ , je napětí rovno  $1191,9 \text{ V}$  což potvrzuje správnost výpočtu Obr. 4.10.



Obr. 4.10: Napětí banky kondenzátorů v době  $5\tau$

Před procesem elektroporace je tedy nutné spustit nabíjení alespoň o 500 s dříve, aby došlo k dostatečnému nabití banky kondenzátorů.

Druhá simulace ukazuje poměry v obvodu při samotné elektroporaci Obr. 4.11.

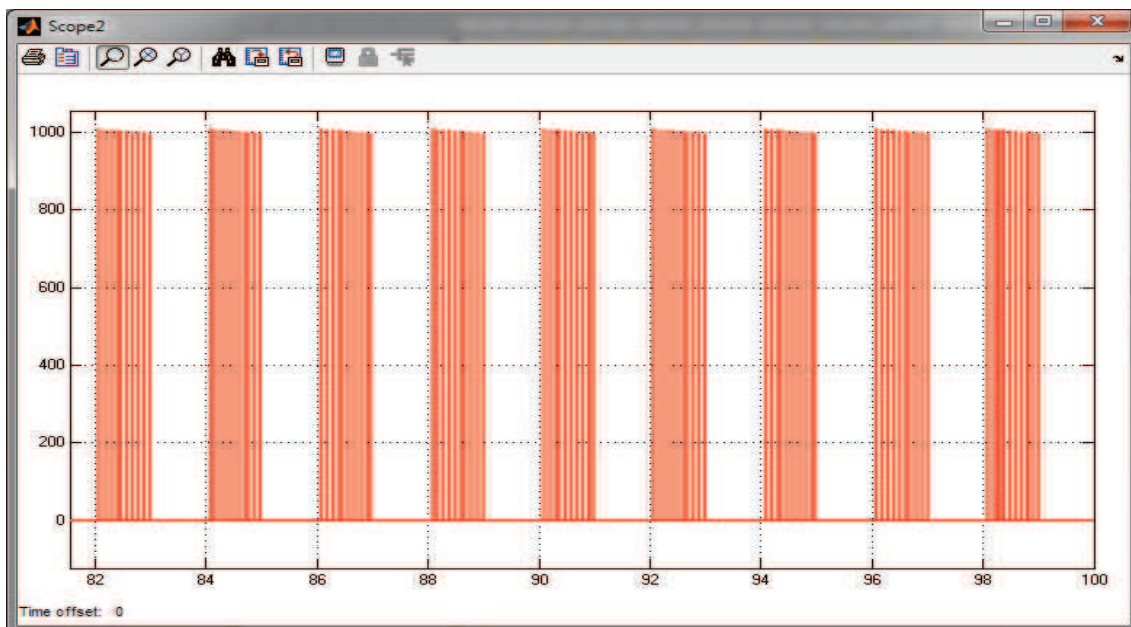


Obr. 4.11: Schéma obvodu pro simulaci průběhu elektroporace

Hodnoty pasivních prvků  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $L$ ,  $R_L$  jsou stejné jako v předchozí simulaci, hodnota  $R$  byla změněna na  $3300 \Omega$ . Tato hodnota byla určena z výpočtů v kap. 3.4. Byla vypočtena s ohledem na parametry zdroje a také na dostatečně krátkou dobu časové konstanty.  $R_O = 47 \Omega$  a rezistor PEF má nastavenou průměrnou hodnotu odporu ošetřovaných vzorků, to je cca  $250 \Omega$ . Pro simulaci bylo použito ideálních přepínačů,

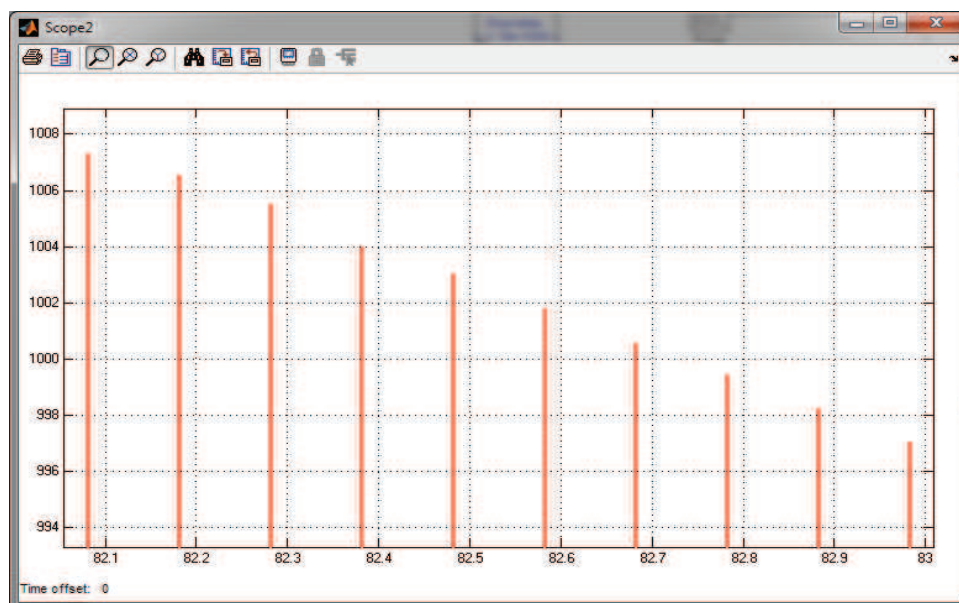
kteře mají skokovou odezvu, to ve skutečnosti není možné. Jako spínače budou použity IGBT tranzistory, které mají dobu přechodu 90 ns/kV, tato doba je vzhledem k době trvání impulsů zanedbatelná, a proto nebyla při simulaci uvažována.

Při simulaci bylo sledováno několik parametrů, ze kterých bylo určeno, zda se kondenzátorová síť při pracovním vytížení bude stíhat dostatečně dobíjet.



Obr. 4.12: Graf zobrazující pulsy napětí na ošetřovaném vzorku

Obr. 4.12 ukazuje průběh impulsů napětí na ošetřovaném vzorku, když si tento průběh přiblížíme, viz Obr. 4.13, je vidět, že velikost pulsů klesá s jejich počtem. Do dalšího shluku se ovšem banka kondenzátorů stihne dostatečně dobít a velikost pulsů je opět stejná jako na Obr. 4.12.



Obr. 4.13: Průběh pulsů jednoho shluku

## 5 KONSTRUKCE

Návrh desek plošných spojů, dále jen DPS byl prováděn v programu Eagle. Dílčí části elektrického schématu byly popsány v kapitole 3.

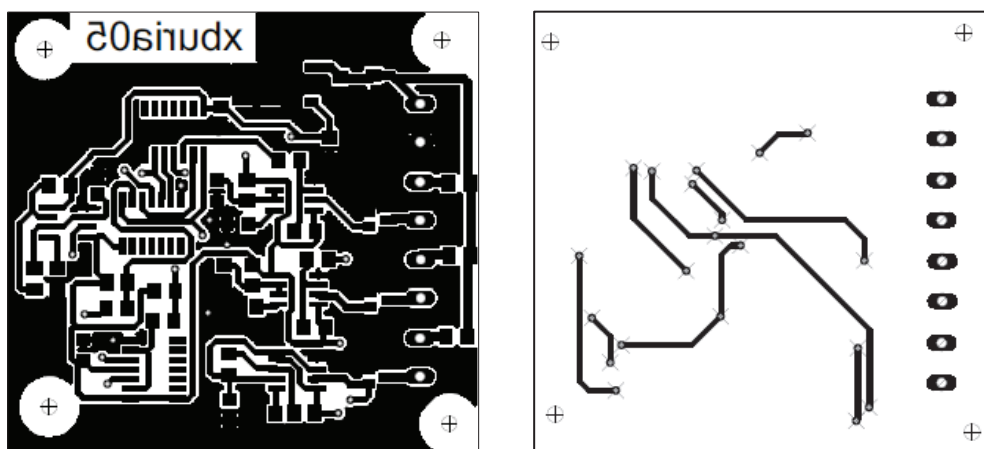
Při návrhu DPS je nutné se řídit se určitými pravidly. Mezi nejdůležitější patří:

- Zkrácení délky spojů, zvláště signálových
- Omezení paralelních vedení vodičů
- Oddělení signálové části od části výkonové
- Umisťování kondenzátorů, které blokují napájení logických obvodů do co největší blízkosti těchto obvodů
- Pokud je nutné použít propojku pro signálový vodič, je vhodné používat vodič stíněný
- Zavedení zemního vodiče tam, kde nevede signálový vodič

Jak již bylo uvedeno výše, celkové zařízení bylo rozděleno na několik desek.

### 5.1 Deska řídicích obvodů

Pro desku řídicích obvodů bylo použito v co největší možné míře součástek SMD (součástky pro povrchovou montáž). Deska byla navržena dle celkového schématu, viz Obr. 3.10. Desky plošných spojů jsou vidět na Obr. 5.1.

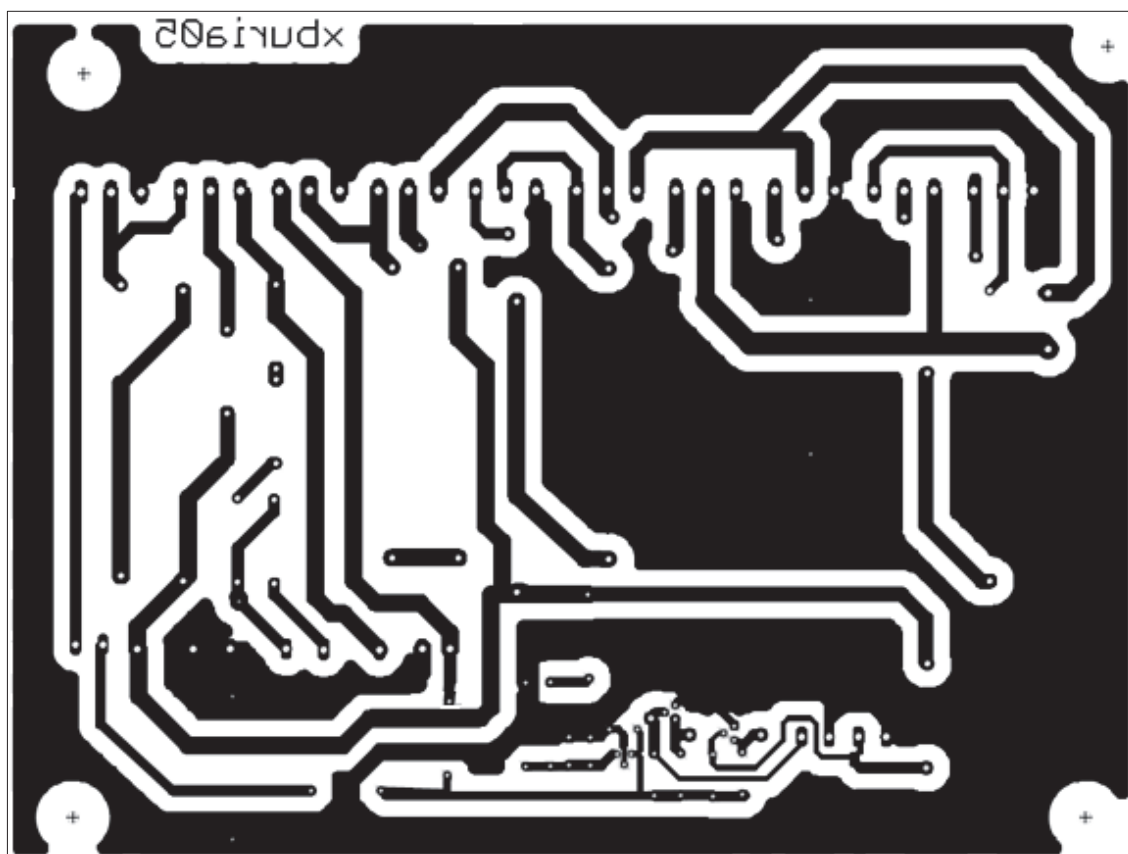


Obr. 5.1: Deska plošných spojů ze strany BOTTOM (vlevo) a TOP (vpravo)

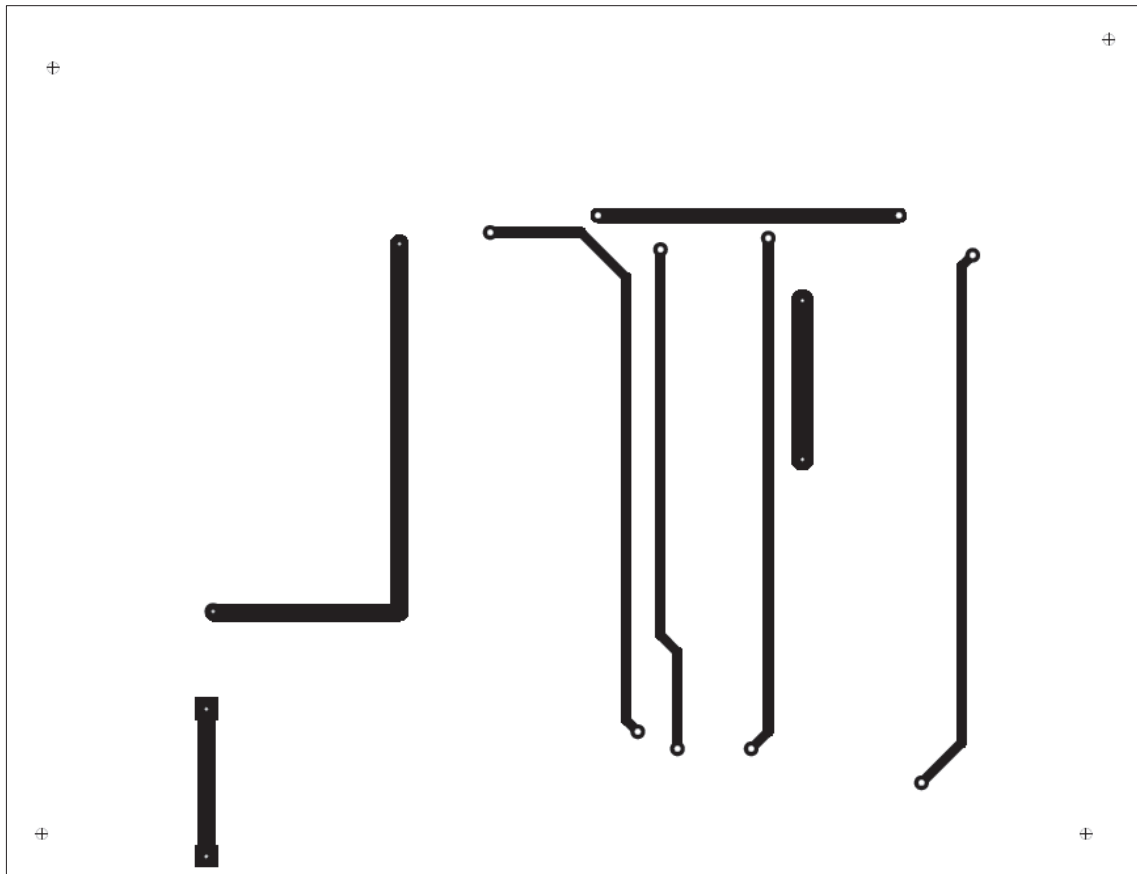
Rezistory a kondenzátory byly voleny z řady 1206, pouzdra integrovaných obvodů byla použita typu SO8 nebo SO16 podle počtu vývodů, použité tranzistory byly osazeny v pouzdrech SOT23 a stabilizátor byl v pouzdru DPAK. Díky tomu značně klesly rozměry celé desky a také se zkrátily cesty mezi jednotlivými součástkami díky bezvývodovému provedení součástek. Osazovací výkresy jak ze strany součástek, tak ze strany spojů jsou uvedeny v Příloze 1.

## 5.2 Deska výkonových spínačů

Výkonová deska je navržena jako dvouvrstvá Obr. 5.2 a 5.3, vrstva TOP je ovšem realizována pouze drátovými propojkami. U této desky je použito klasických vývodových součástek (osazovací výkres viz Příloha 2), protože zde rozměry desky nejsou tak kritické jako u desky řídicí. Dalším důvodem je také to, že je zde použito výkonových tranzistorů IGBT, které se v SMD provedení ani nevyrábí, stejně jako výkonové odpory. Při návrhu byla snaha v co nejvyšší míře oddělit výkonovou část desky (část kde se pracuje s vysokým napětím) od části určené k ovládání hradel tranzistorů. V opačném případě by mohlo docházet k ovlivňování řídicích signálů. Jelikož jsou ale některé tranzistory ovládány napětím 15 V, ale spínají 1200 V (není možné od sebe více oddálit), nebylo možné tohoto docílit úplně. Na desce je v pravém dolním rohu je vidět část, ve které jsou umístěny části obvodů, které pracují s malým napětím. Z této části je pak bráno ovládací napětí pro hradla výkonových tranzistorů. Tato část je od vysokonapěťové části oddělena alespoň plochou mědi, která je spojena se zemí.



Obr. 5.2: DPS výkonové desky ze strany BOTTOM (65% originální velikosti)



Obr. 5.3: DPS výkonové desky ze strany TOP (65% originální velikosti)

Výkonové tranzistory je zapotřebí připevnit na chladiče z důvodu vysokého ztrátového výkonu. V opačném případě by došlo k jejich přehřátí a následnému zničení. Byla zvolena varianta, ve které budou tranzistory přišroubovány na velký chladič vyrobený z hliníkového profilu.

Přípustné zatížení tranzistoru se vypočte dle vzorce [23]:

$$P_{MAX} = \frac{T_V - T_C}{R_{TV} + R_{TS} + R_{TC}} \quad (17)$$

kde  $T_V$  značí teplotu čipu tranzistoru,  $T_C$  je teplota chladiče,  $R_{TV}$  vnitřní tepelný odpor tranzistoru,  $R_{TS}$  je přestup tepla z pouzdra na chladič a  $R_{TC}$  vyjadřuje tepelný odpor chladiče.

Teplota čipu 150 °C byla zjištěna z katalogového listu, teplota chladiče byla zvolena 20 °C, což je obvyklá pokojová teplota, vnitřní tepelný odpor tranzistoru byl opět zjištěn z katalogového listu a jeho hodnota je 0,75 K/W, u koeficientu přestupu tepla ze součástky na chladič je nutné brát v potaz také izolační podložky, která nám tuto hodnotu zvyšuje. Při přímé montáži tranzistorů na chladič je tepelný stykový odpor asi 0,2 – 0,4 K/W pokud by byla použita tepelná pasta, klesá jeho hodnota na 0,1 K/W. Při použití izolační podložky je nutno počítat se zvýšením tepelného odporu o 0,4 K/W. Potom bude tedy při použití izolační podložky, bez tepelné pasty, tepelný odpor celkem 1 W/K. Při použití podložky potřené z obou stran tepelnou pastou tato hodnota klesne



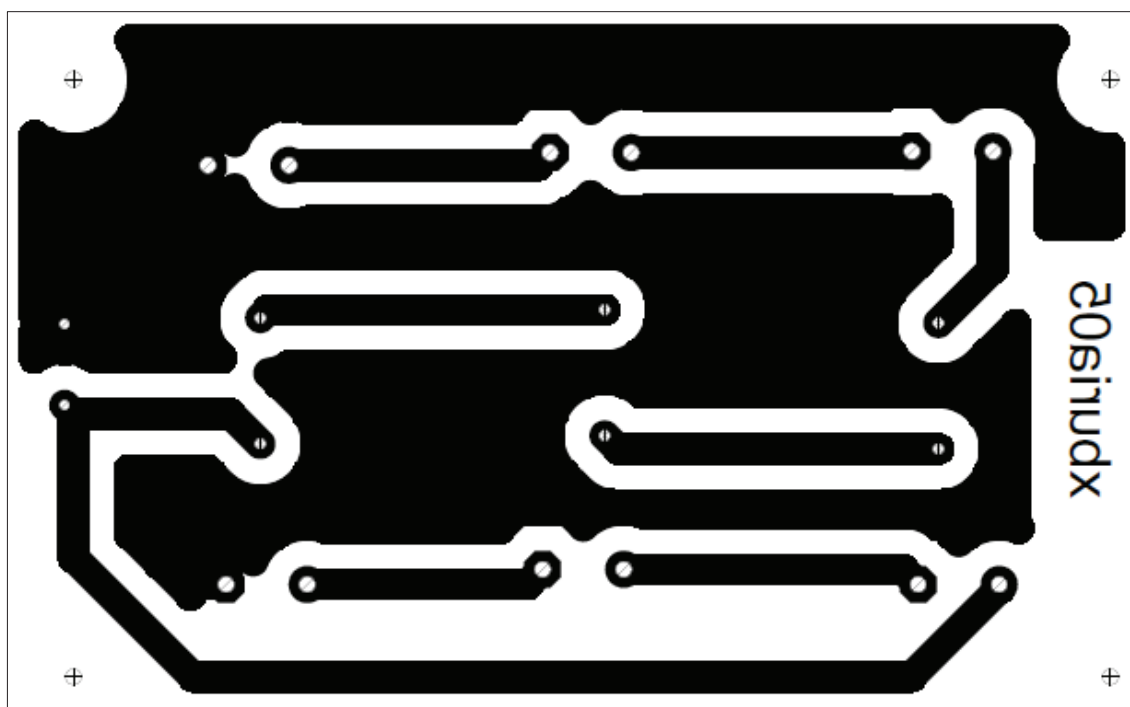
na cca 0,3 až 0,6 W/K [23]. Poslední hodnota, kterou potřebujeme znát je tepelný odpor chladiče, ten zjistíme opět z katalogového listu, v tomto případě 2,7 W/K [16]. Po dosazení do vzorce (17) dostaneme výsledek:

$$P_{MAX} = \frac{150 - 20}{0,75 + 1 + 2,7} = 29W$$

Jedná se o maximální celkový ztrátový výkon na všech tranzistorech, které jsou připevněny na chladič. V tomto případě jsou použity dva stejné chladiče, na každý je přišroubováno 5 výkonových tranzistorů, celkový ztrátový výkon může být tedy  $2 \times 29 = 58W$ . Ztrátový výkon při impulsích je vyšší, ovšem doba trvání impulsů je velmi krátká, tudíž by takovéto chlazení mělo být dostačující.

### 5.3 Deska banky kondenzátorů

Poslední deskou, která byla vyrobena, je deska s bankou kondenzátorů. Tato deska je pouze jednostranná a je vidět na Obr. 5.4.



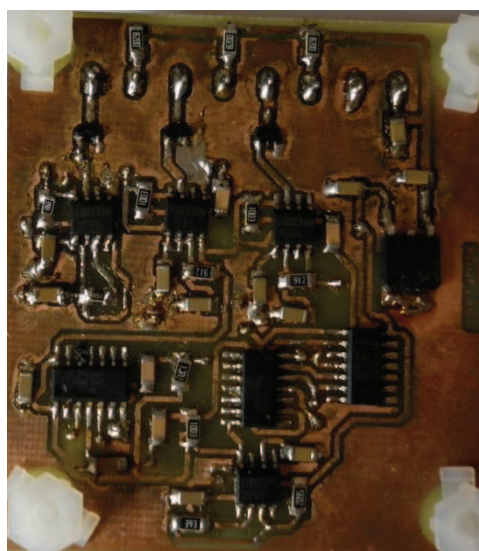
Obr. 5.4: DPS banky kondenzátorů

U všech desek muselo být samozřejmě při návrhu počítáno s normami pro proudovou zatížitelnost plošných spojů a také pro izolační vzdálenosti na plošných spojích ČSN EN 61010-1 [8]. Tyto normy byly důležité především při návrhu desky výkonových spínačů a desky s bankou kondenzátorů, protože na těchto deskách se pracuje s proudy řádově v jednotkách ampér a stovkách až tisících voltů.



## 5.4 Osazení desek

Deska řízení byla uložena samostatně do sériově vyráběné plastové krabičky s označením U-MINI, jejíž rozměry jsou 69x69x32 mm. V krabičce je upevněna na plastových distančních sloupcích výšky 5 mm. Osazená deska je vidět na Obr. 5.5. Napájení je řešeno adaptérem se jmenovitou hodnotou napětí 20 V. Zařízení je s adaptérem spojeno souosým napájecím konektorem s průměrem 2,1 mm. Pro ochranu proti zkratu je použito rychlé tavné pojistky se jmenovitým proudem 150 mA, tato hodnota je dostačující pro práci zařízení, protože měřením bylo zjištěno, že zařízení v běžném provozu odebírá maximální proud 100 mA. Samozřejmostí je spínač, kterým je celé zařízení uváděno do provozu a opět vypínáno. Jako výstupní svorky byly použity přístrojové zdířky SBZ s vnitřním průměrem 4 mm. Propojení mezi zařízeními je prováděno kabely s tzv. banánky.



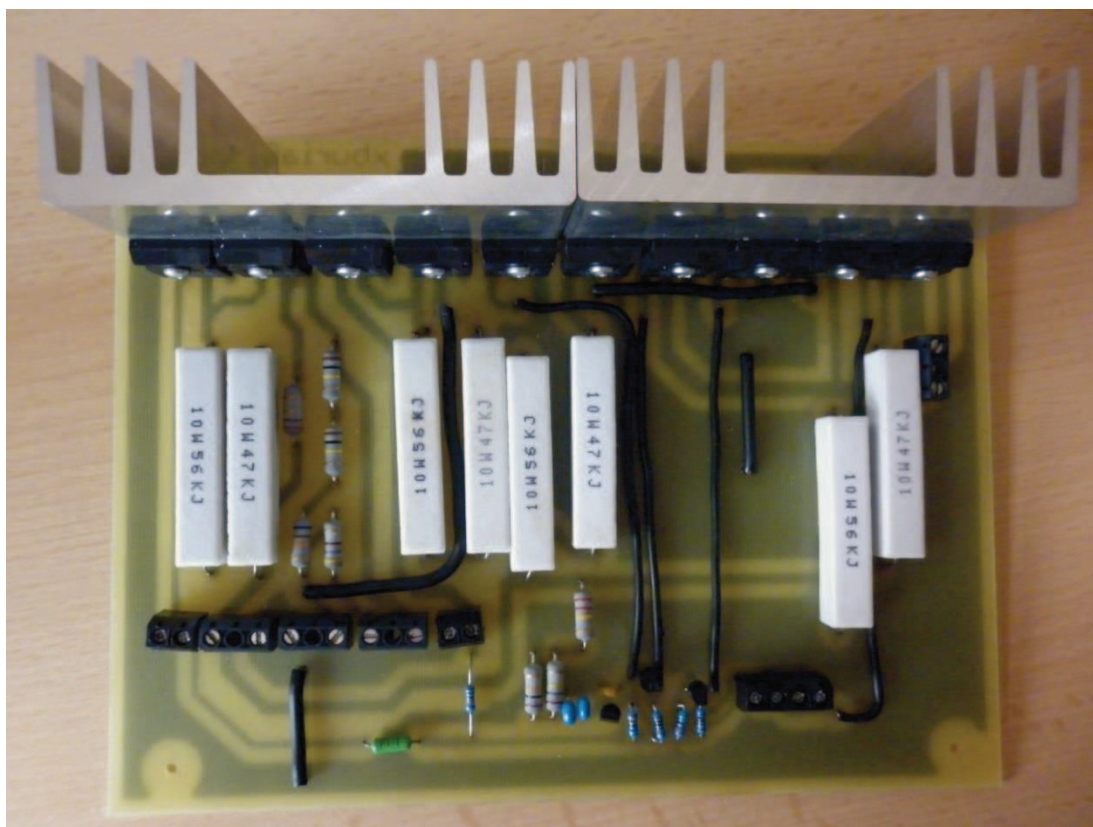
Obr. 5.5: Osazená deska řídicích obvodů

Deska s bankou kondenzátorů Obr. 5.6, je umístěna do plastové krabice U-KPZ8 jejíž rozměry jsou 179x100x74. K propojení s deskou výkonových spínačů je použito opět přístrojových zdířek, tyto zdířky musí být vzhledem k vysokému napětí jiné než zdířky SBZ. Proto byly vybrány zdířky typu AMASS. Tyto zdířky mají vnitřní průměr 2 mm a kontakt je zapuštěn hlouběji, aby byla omezena možnost náhodného dotyku, čímž je sníženo nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Také propojovací kabely musí být voleny se zesílenou izolací.



Obr. 5.6: Osazená deska banky kondenzátorů

Deska výkonových spínačů, která je vidět na Obr. 5.7, je uložena v krabici PRO'SKIT 203-115B o rozměrech 253x190x82 mm. Vstupní svorky pro řídicí signály jsou použity stejné jako v případě desky řídicí, tedy přístrojové zdířky SBZ. Pro napájecí napětí, spojení s bankou kondenzátorů a výstup k elektrodám jsou použity zdířky typu AMASS.



Obr. 5.7: Osazená deska výkonových spínačů

Deska řízení nemůže být spojena s výkonovou deskou přímo. Pokud by došlo k poškození výkonových IGBT tranzistorů mohlo by dojít k průrazu a nebezpečné napětí by se mohlo dostat až na desku řídicích obvodů, kde by způsobilo fatální následky. Součástky na řídicí desce jsou technologie CMOS, a tudíž jsou velmi náchylné na přepětí. Pro galvanické oddělení desek bylo použito optočlenů PC817B. Jejich izolační pevnost je 5 kV [7], což je pro toto použití dostačující. I když jsou zapotřebí čtyři řídicí signály, z řídicí desky jsou přiváděny pouze tři. Poslední signál se získá invertováním signálu pro řízení nabíjení banky kondenzátorů.

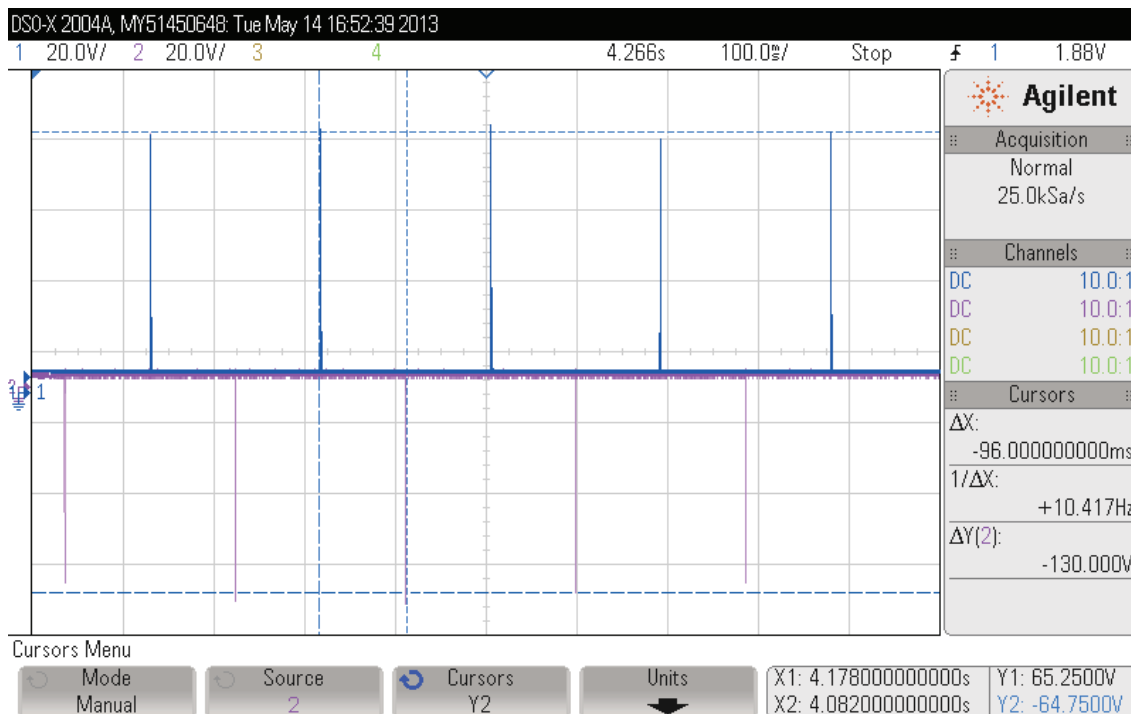
## 6 MĚŘENÍ

Měření probíhalo ve školních laboratořích. Bohužel nebyl k dispozici vhodný zdroj, který by byl schopen dodat požadované napětí 1200 V. Proto byl použit stejnosměrný zdroj Agilent 6035A, který je schopen dodat 500V/2A [2].

Vzhledem k tomu, že výkonová deska byla při návrhu dimenzována právě na hodnotu 1200 V, vyvstal při měření problém s napájením pomocných obvodů. Tyto obvody jsou napájeny ze stabilizátoru 78L15, jehož vstupní napětí je bráno z jedné části napěťového děliče. Pro stabilizátor 78L15 je rozsah vstupního napětí pro správnou funkčnost obvodu cca 17-35 V [22]. Dělič, který byl použit, dělí napětí v poměru 1:40. Tento poměr umožňuje celkem velký rozsah pracovních napětí, od cca 680 V do 1400 V. Při celkovém napětí 500 V by bylo napětí na vstupu děliče tedy 12,5 V, což je pro napájení stabilizátoru nedostačující. Proto muselo být použito dalšího pomocného zdroje, který dodával napětí místo stabilizátoru. Jako pomocný zdroj byl použit Agilent 3631A [1].

K simulaci zátěže byl použit výkonový odpor  $63\Omega/1,2A$ . Odpor zátěže, se kterou bylo počítáno při návrhu, klesal v minimální hodnotě k  $180\ \Omega$ . Tato hodnota je cca 3x větší než hodnota použitého odporu, ale to bylo vykompenzováno poklesem napětí oproti napětí, které bylo použité při návrhu. Proto by měl být proud protékající naší zátěží zhruba stejný jako se očekává při praktickém použití při elektroporaci.

Průběh napětí byl měřen v rozsahu od 50 do 450 V. Nemohlo být měřeno vyšší napětí, neboť časové průběhy již nejsou na osciloskopu plně viditelné.

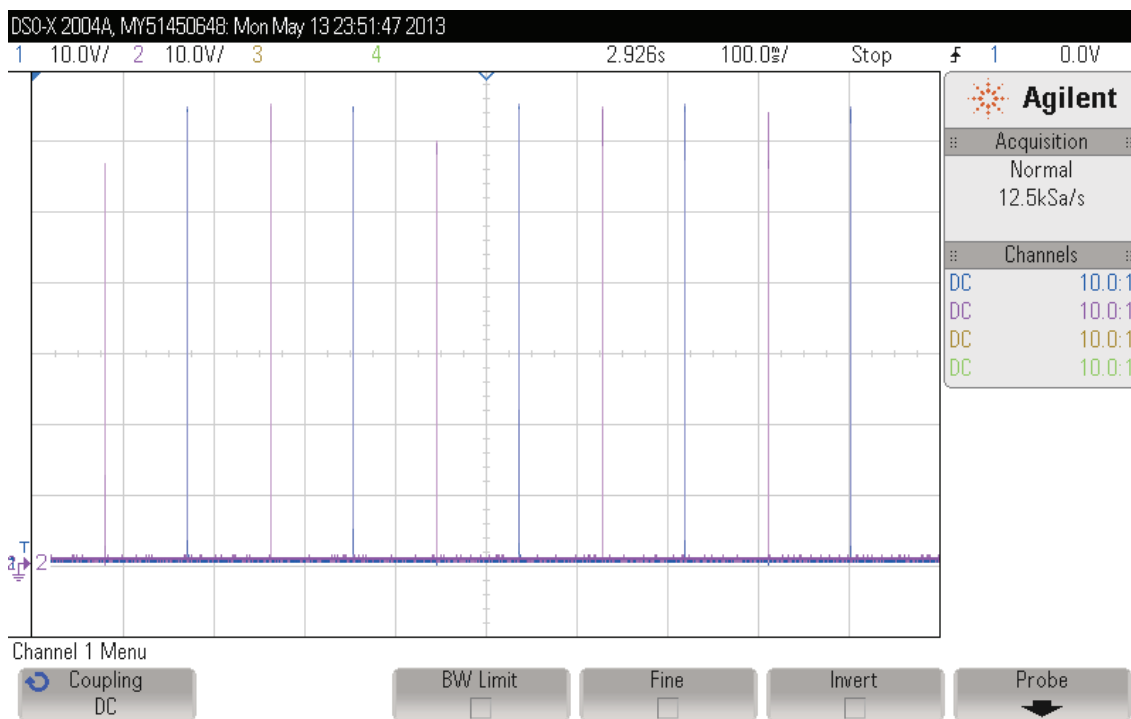


Obr. 6.1: Zobrazení pulsů na zátěži při vstupním napětí velikosti 75 V

Na Obr. 6.1 je vidět průběh napětí na zátěži při vstupním napětí 75 V. Jak je z obrázku patrné kanál 1 zobrazuje kladné pulsy a kanál 2 pulsy záporné. Pro lepší ilustraci hodnot jsou v obrázku zobrazeny také kurzory.

Na ose X je měřena doba mezi jednotlivými pulsy.  $\Delta X$  kurzorů, které jsou nastaveny na dva po sobě jdoucí impulsy je 96 ms. Zadaná hodnota doby mezi pulsy byla 100 ms, odchylka tedy činí cca 4 ms, tato hodnota je pro použití v elektroterapii přijatelná. Doba 100 ms byla zvolena jako optimální na základě několika studií [11], [13], [17]. U každé ze studií se výsledky mírně lišily, není proto nutná úplná přesnost. Odchylka může být způsobena tolerancemi použitých součástek.

Kurzory na ose Y měří velikost pulsů.  $\Delta Y$  udává celkovou amplitudu pulsů, která je tedy 130 V. Velikost jednoho impulsu je tedy poloviční, v tomto případě 65 V. Rozdíl mezi napětím vstupním a napětím pulsu je dán úbytky na tranzistorech. Další nepřesnost může být také dána rozlišovací schopností osciloskopu. Tato nepřesnost se projevuje tím, že některé pulsy jsou výrazně menší než předchozí a následující viz Obr. 6.2. Osciloskop jednoduše není schopen tak rychle zareagovat.

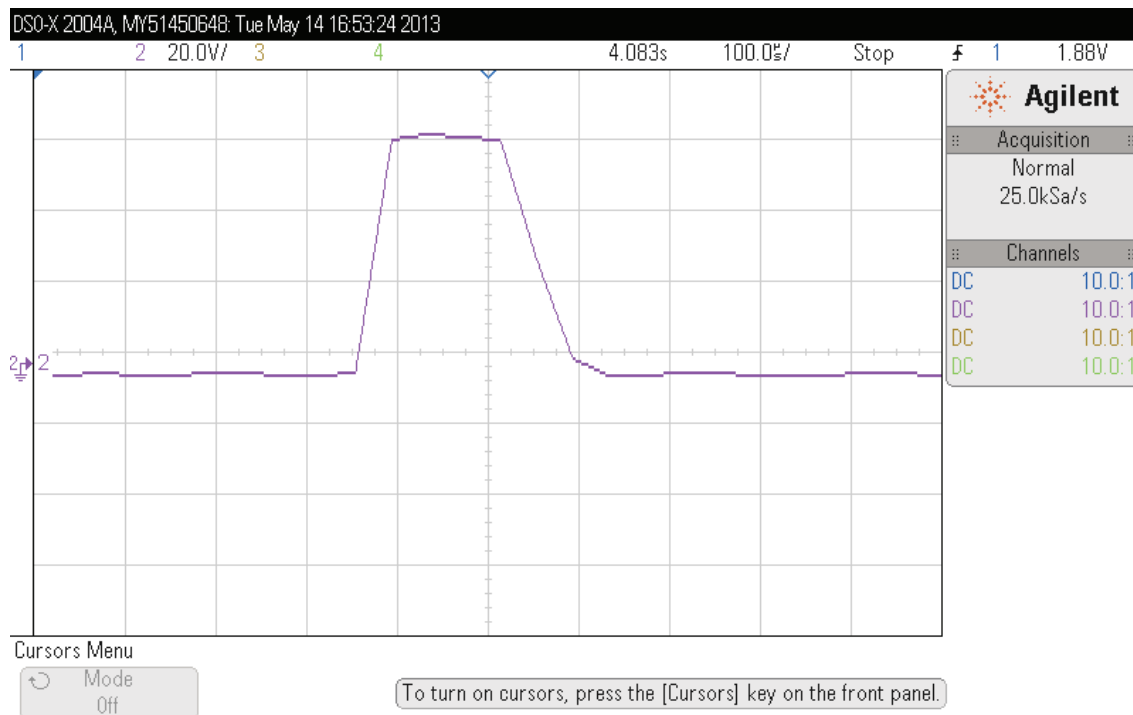


Obr. 6.2: Zobrazení pulsů na zátěži při vstupním napětí velikosti 75 V (měřeno proti zemi)

Na Obr. 6.2 jsou vidět impulsy výstupního napětí změřené proti zemi. Tím bylo dosaženo toho, že jsou všechny pulsy zobrazeny jako kladné.

Obr. 6.3 ukazuje detail jednoho impulsu. Délka pulsu je cca 120  $\mu\text{s}$ . Délka spouštěcího pulsu je ovšem 100  $\mu\text{s}$  dle zadání viz Obr. 22. Toto roztažení délky pulsu může být způsobeno nedostatečně rychlým nabíjením a vybíjením parazitní kapacity výkonových tranzistorů (sepnutí a rozepnutí tranzistoru trvá delší dobu). Celková doba trvání pulsu od začátku náběžné doby do doby, kdy je napětí zpátky na nulové hodnotě, trvá cca 250  $\mu\text{s}$ . Tento vliv je možné potlačit snížením odporů, přes které dochází

k nabíjení a vybíjení těchto parazitních kapacit, v tomto případě  $R_2$ ,  $R_3$  a  $R_{10}$ ,  $R_{11}$ . Snížením těchto odporů by ovšem stoupl proud, který jimi prochází v době, kdy jsou sepnuty tranzistory  $Q_1$  a  $Q_3$ . V takovém případě by stoupl také výkon, který se na nich ztrácí a tím také výkon, který je dodáván zdrojem, což je nežádoucí. Velikost  $R_2$ ,  $R_3$  a  $R_{10}$ ,  $R_{11}$  je tedy dána přijatelným kompromisem. Možným řešením by bylo také použití IGBT driverů, od kterých se však z již výše uvedených důvodů upustilo.

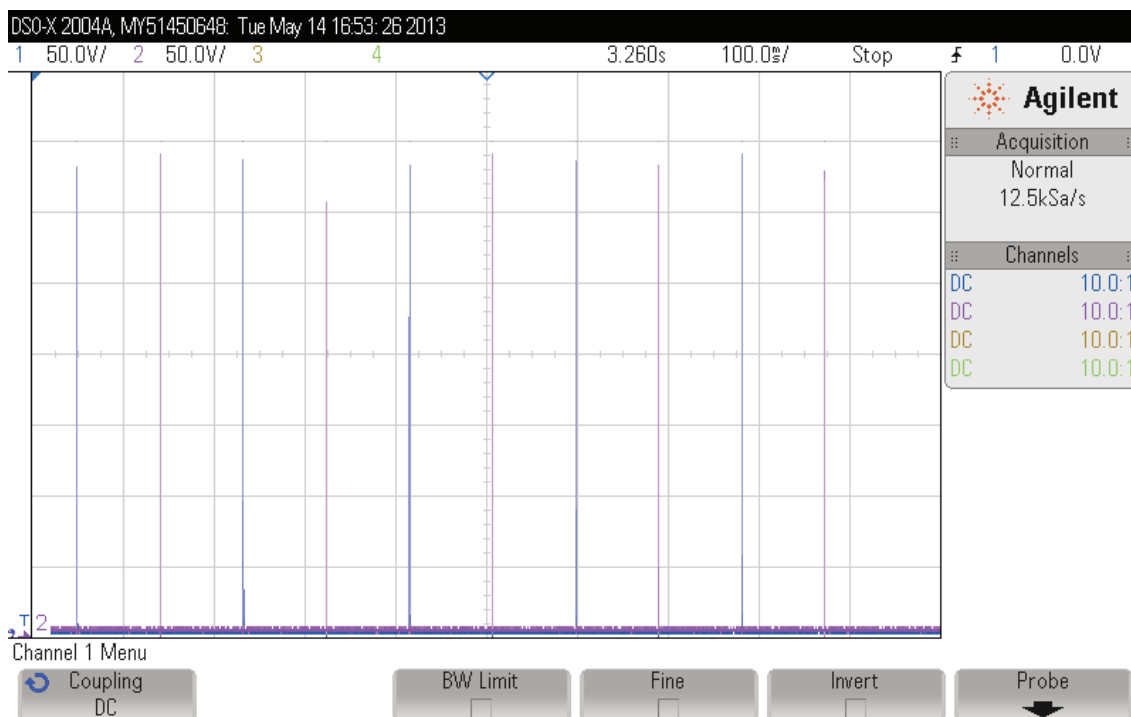


Obr. 6.3: Detail jednoho pulsu při vstupním napětí velikosti 75 V

Jak již bylo napsáno dříve, byly měřeny pulsy v rozsahu napájecího napětí od 50 do 450 V, Obr. 6.1-6.3 ukazují průběh při vstupním napětí 75 V. Na ukázkou zde budou uvedeny ještě impulsy s vstupním napětím 350 V viz Obr. 6.4-6.6.

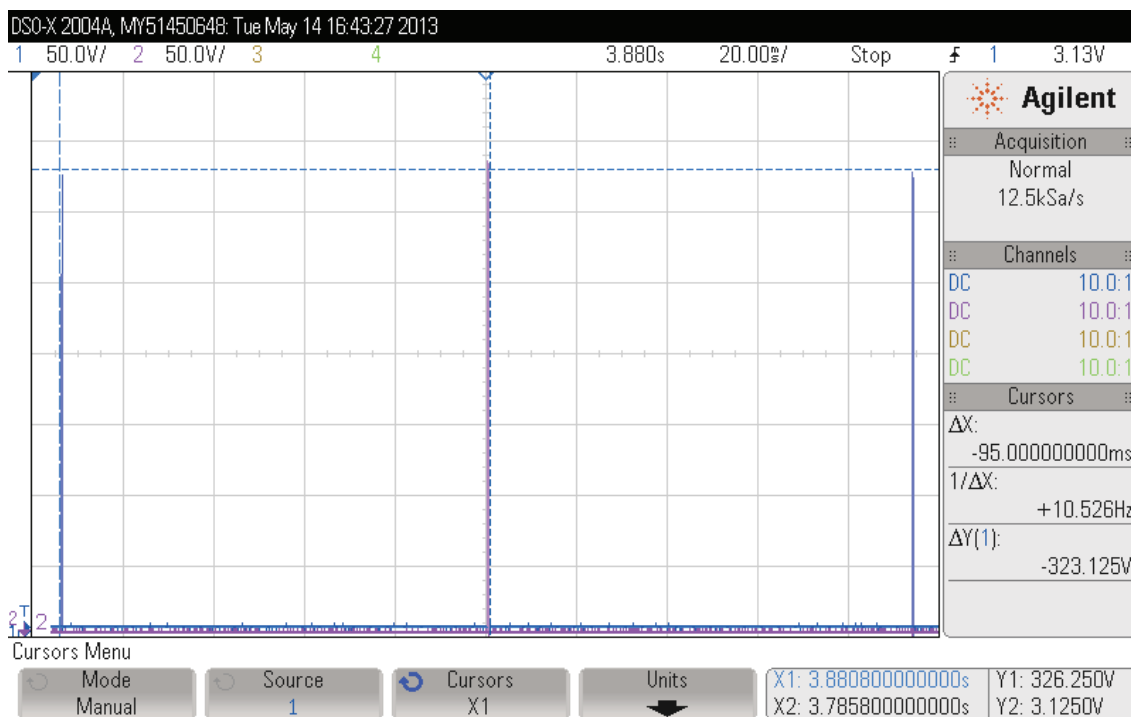
Na Obr. 6.4 je vidět shluk deseti impulsů obdobně jako na Obr. 6.2. Při těchto větších napětích (více než 150 V) probíhalo měření pouze proti zemi, protože při těchto napětích by nestačila velikost osciloskopické obrazovky. Při napětí 200 V by už i při rozlišení 50 V/dílek zabíral rozkmit měřeného napětí celý rozsah. Jako možné řešení by se jevilo použití sond k osciloskopu, které by měly dělicí poměr větší než sondy použité, jejichž poměr byl 1:10. Větší dělicí poměr však nepodporuje ani používaný osciloskop, naměřené hodnoty by tedy musely být dále ještě přepočítávány a vzhledem k tomu že měření proběhlo na téměř celém rozsahu zdroje, nebylo k tomuto kroku přistoupeno.



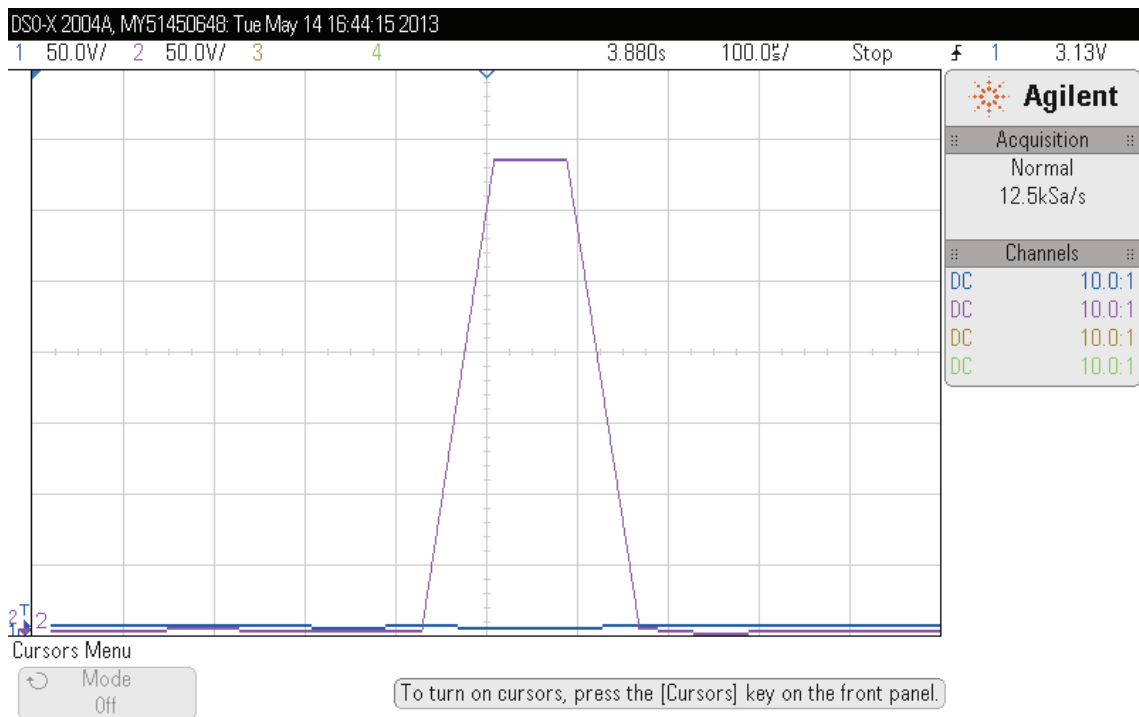


Obr. 6.4: Zobrazení pulsů na zátěži při vstupním napětí velikosti 350 V (měřeno proti zemi)

Obr. 6.5 ukazuje pro názornost přibližnou část shluku, konkrétně 3 pulsy. Jak je vidět, pomocí kursorů je měřena doba mezi jednotlivými pulsy  $\Delta X$  v tomto případě 95 ms což koresponduje s hodnotou naměřenou výše. Amplituda pulsů je  $\Delta Y = 323$  V, což odpovídá hodnotě vstupního napětí 350 V.



Obr. 6.5: Detail tří pulsů při vstupním napětí velikosti 350 V (měřeno proti zemi)



Obr. 6.6: Detail pulsu při vstupním napětí velikosti 350 V (měřeno proti zemi)

Obr. 6.6 zobrazuje detail jednoho impulsu při vstupním napětí 350V. Jak je vidět v tomto případě je doba setrvání pulsu v maximální hodnotě rovna přibližně hodnotě 90  $\mu\text{s}$  ovšem doba trvání celého pulsu včetně doby náběhu sestupu je opět cca 250  $\mu\text{s}$  jako v případě Obr. 6.3.

Jak je z naměřených průběhů vidět, výstupní pulsy jsou pro různá napětí stejné, jediná část, která se mění je jejich amplituda, což je samozřejmé. Zařízení je tedy schopno dodávat pulsy stejné délky a se stejnou dobou mezi sebou pro různá napětí, což je pro použití v elektroterapii žádoucí.



## 7 ZÁVĚR

V této diplomové práci byl řešen návrh koncepce výkonového zdroje pro generování pulsního elektrického pole pro potřeby technologického procesu elektroporace ovocných moštů a rmutů. Na základě vhodných časových průběhů byl proveden návrh sítě kapacitorů a induktorů. Dále bylo úkolem navrhnout a realizovat základní řídicí jednotku a také výkonovou desku spolu se spínacími tranzistory.

Celá práce byla rozdělena do několika celků.

První část byla věnována studiu teoretických poznatků z oblasti elektroporace a ošetřování různých materiálů pulsním elektrickým polem. Na základě získaných informací byly zvoleny průběhy a jejich parametry, ke kterým byl v dalších částech směřován samotný návrh a konstrukce.

V druhé části byl proveden rozbor elektroporačního pracoviště. Byly zde podrobně rozebrány jeho jednotlivé části od elektrodové komory přes řídicí obvody až po výkonové spínače. U každé části byly nastíněny a rozebrány její požadované vlastnosti a jednotlivé možnosti realizace. U každé z možností byly zmíněny jejich výhody či nevýhody pro konkrétní použití.

Třetí část již byla věnována samotnému návrhu. Na základě parametrů pulsů zvolených za pomoci informací z první části, byly provedeny potřebné výpočty. Bylo postupováno po jednotlivých, dílčích krocích. Nejprve byl proveden výpočet odporu ošetřovaného materiálu. Výsledek byl využit v další části při výpočtu minimálního potřebného výkonu zdroje. Z vlastností zdroje a informací o potřebných časových průbězích byly nakonec dopočítány hodnoty pasivních prvků, především banky kondenzátorů. Dále již bylo přikročeno k návrhu parametrů jednotlivých desek. Nejprve byla navržena deska řídicích obvodů. V této části je podrobně popsáno, jak bylo k návrhu přistoupeno a způsob práce, podle kterého bylo při návrhu postupováno. Dále je detailně popsán postup návrhu a výpočtu jednotlivých součástek desky výkonových spínačů.

Další oddíl je věnován simulacím. Byly provedeny simulace chování ošetřovaného materiálu v programu ANSYS. Konkrétně rozložení elektrického potenciálu a velikost intenzity elektrického pole ve vzorku při ošetřování. Dále byly provedeny simulace elektrických poměrů v obvodu při elektroporaci pro ověření správnosti výpočtů parametrů jednotlivých součástek.

Pátá část je věnována konstrukci celého zařízení. Nejprve jsou stanovena některá základní pravidla pro konstrukci. Dále jsou zde zobrazeny a popsány jednotlivé DPS u nichž je zdůrazněno, na co bychom si měli dávat při návrhu a konstrukci pozor. Také tu je zdůvodněn výběr typů jednotlivých součástek a popsáno usazení desek do jednotlivých krabic.

V poslední části je přistoupeno k měření na zhotoveném pracovišti. Jsou zde zobrazeny grafy z jednotlivých měření spolu s jejich popisem a rozbořením příčin případných nejasností. Grafy na nichž jsou zobrazeny průběhy obdobných měření, jsou porovnány a je provedena diskuse těchto výsledků.

Výsledkem této práce je základ pracoviště pro elektroporaci ovocných moštů a rmutů. Podrobný popis a rozbor jednotlivých částí umožňuje snadnou modifikaci či vlastní realizaci pracoviště vyhovujícího individuálním požadavkům uživatele.

# LITERATURA

- [1] AGILENT TECHNOLOGIES, *Agilent 3631A Triple Output DC Power Supply User's Guide*, October 2007, 168s. [cit. 2013-05-07]. Dostupný z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/E3631-90002.pdf>>
- [2] AGILENT TECHNOLOGIES, *Agilent 6030 Series Single-Output, DC Power Supplies 200 W & 1000 W, Autoranging*, July 2012, 4s. Datasheet. [cit. 2013-05-07]. Dostupný z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-9297EN.pdf>>
- [3] ANSYS. Inc. *Coupled-Field Analysis Guide*, Release 12.1, November 2009. [cit. 2012-10-07]. Dostupné z WWW: <[www.ansys.com/customer/content/documentation/120/ans\\_cou.pdf](http://www.ansys.com/customer/content/documentation/120/ans_cou.pdf)>
- [4] ANSYS. Inc. *Low-Frequency Electromagnetic Analysis Guide*, Release 12.0, April 2009. [cit. 2012-10-07]. Dostupné z WWW: <[www.ansys.com/customer/content/documentation/120/ans\\_lof.pdf](http://www.ansys.com/customer/content/documentation/120/ans_lof.pdf)>
- [5] Bio.davidson.edu [online]. [cit. 2012-11-07]. *Molecular Tool: Electroporation*. Dostupné z WWW: <<http://www.bio.davidson.edu/courses/molbio/molstudents/spring2003/mccord/electroporation.htm>>
- [6] BOUZRARA, H.; VOROBIEV, E. *Beet juice extraction by pressing and pulsed electric fields*. International Sugar Journal 2000 Vol. 102 No. 1216, Pages. 194-200
- [7] BRIGHT LED ELECTRONICS CORPORATION, *BPC-817 optocoupler*. Ver2.1, 6s. Datasheet. [cit. 2012-10-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.gme.cz/dokumentace/523/523-249/dsh.523-249.1.pdf>>
- [8] ČSN EN 61010-1 ed. 2. *Bezpečnostní požadavky na elektrická měřicí, řídicí a laboratorní zařízení - Část 1: Všeobecné požadavky*. Praha: Český normalizační úřad
- [9] DAVALOS, R.V.; MIR, L.M.; RUBINSKY, B. *Tissue Ablation with Irreversible Electroporation*. Annals of Biomedical Engineering, Vol. 33, No. 2, February 2005, Pages 223–231
- [10] De VITO, F., DONSI G, and FERRARI, G. *Effects of Pulsed Electric Field on permeabilization of cell membranes of fruits and vegetables*, in Proc. Intrafood, Innovations in Traditional Foods, Valencia, Spain, 2, 1515-1518, 2005.
- [11] DEJMEK, P. De VITO, F., FINCAN, M., *Pulsed electric field treatment for solid-liquid extraction of red beetroot pigment*, Journal of Food Engineering, 64, 381-388, 2004
- [12] EING, C.; MULDER, G.; SACK, M.; SIGLER, J.; STANGLE, R.; STUKENBROCK, L.; WOLF, A.; *Electric measurement of the electroporation efficiency of mash from wine grapes*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 5; October 2009

- [13] GRIMI, N.; LEBOVKA, N. I.; VAXELAIRE, J.; VOROBIEV, E., *Effect of a Pulsed Electric Field Treatment on Expression Behavior and Juice Quality of Chardonnay Grape*. Food Biophysics September 2009, Volume 4, Issue 3, Pages 191-198
- [14] IVORRA, A.; MAOR, E.; RUBINSKY, B. *Non Thermal Irreversible Electroporation: Novel Technology for Vascular Smooth Muscle Cells Ablation*. PLoS ONE 4(3): e4757. doi:10.1371/journal.pone.0004757
- [15] IXYS CORPORATION, *IXBH 9N160G High Voltage BIMOSFET*, May 2000, 4s. Datasheet. [cit. 2013-05-07]. Dostupný z WWW: <<http://ixdev.ixys.com/DataSheet/L458.pdf>>
- [16] Katalog EZK 2007, *CHL255A/60*, 5s. Datasheet. [cit. 2013-05-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.gme.cz/dokumentace/620/620-072/dsh.620-072.1.pdf>>
- [17] LEBOVKA, N.; MIETTON-PEUCHOT, M.; PRAPORSCIC, I.; VOROBIEV, E.; *Pulsed electric field enhanced expression and juice quality of white grapes*. Separation and Purification Technology, Volume 52, Issue 3, January 2007, Pages 520-526
- [18] Mathworks.com [online]. [cit. 2012-11-07]. Products page: Simulink. Dostupné z WWW: <[http://www.mathworks.com/products/simulink/?s\\_cid=wiki\\_simulink\\_8](http://www.mathworks.com/products/simulink/?s_cid=wiki_simulink_8)>
- [19] MULER, G.; SACK, M. *Electrical design of electroporation reactors*. Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on, Pages 133-139
- [20] MULER, G.; SACK, M. *Optimisation of an Electroporation Device for Mash*. Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008. OPTIM 2008. 11th International Conference on, Pages 113-118
- [21] SATTAR, A. *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Basics*, IXYS Corporation document, [cit. 2013-05-07]. Dostupné z WWW: <[http://www.ixyspower.com/images/technical\\_support/Application%20Notes%20By%20Topic/IGBTs/IXYS\\_IGBT\\_Basic\\_I.pdf](http://www.ixyspower.com/images/technical_support/Application%20Notes%20By%20Topic/IGBTs/IXYS_IGBT_Basic_I.pdf)>
- [22] STMicroelectronics, *L78L00 series, Positive voltage regulators*. March 2005, 26s. Datasheet. [cit. 2013-05-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.gme.cz/dokumentace/330/330-017/dsh.330-017.1.pdf>>
- [23] VRBA, K.; *BKEZ Kap.6 Mechanická konstrukce*. Prezentace k přednáškám. Brno: FEKT VUT v Brně.

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- 2D – dvojrozměrný, obrazec popsáný dvěma osami  
3D – trojrozměrný, obrazec popsáný v prostoru třemi osami  
CO<sub>2</sub> – chemická značka oxidu uhličitého  
N<sub>2</sub> – chemická značka dusíku  
CT – computed tomography, počítačová tomografie  
DC – direct current, stejnosměrný proud  
DNA - deoxyribonucleic acid, deoxyribonukleová kyselina  
GTO - gate turn-off thyristor, hradlem vypínaný tyristor  
IGBT - insulated gate bipolar transistor, bipolární tranzistor s izolovaným hradlem  
Obr - Obrázek  
PEF – pulse electric field, pulsní elektrické pole  
SGTC - symmetrical gate commutated thyristor, tyristor se symetrickým hradlem  
 $\tau$  – tau, časová konstanta
- °C – stupeň celsia, jednotka teploty  
°NM – označení stupně cukernatosti vína  
cm<sup>2</sup> – centimetr čtvereční, jednotka plochy  
Hz – hertz, jednotka frekvence  
J – joule, jednotka energie  
kJ.kg<sup>-1</sup> – kilojoule na kilogram, jednotka energie vztažená k hmotnosti  
kV.cm<sup>-1</sup> – kilovolt na centimetr, jednotka intenzity elektrického pole  
k $\Omega$  – kiloohm, jednotka odporu  
k $\Omega$ .cm – kiloohmcentimetr, jednotka rezistivity  
mH – milihenry, jednotka indukčnosti  
mS.cm<sup>-1</sup> – milisiemens na centimetr, jednotka elektrické vodivosti  
N.C<sup>-1</sup> – newton na coulomb, jednotka intenzity el. pole  
ns.kV<sup>-1</sup> – nanosekunda na kilovolt, jednotka doby odezvy  
pH - potential of hydrogen, potenciál vodíku, označení kyselosti  
V – volt, jednotka napětí  
V.cm<sup>-1</sup> – volt na centimetr, jednotka intenzity elektrického pole

W – watt, jednotka výkonu

Ws – wattsekunda, jednotka energie

$\Omega$  – ohm, jednotka odporu

$\mu\text{F}$  – mikrofarad, jednotka kapacity

# SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Osazovací výkresy desky řídicích obvodů.

Příloha 2: Osazovací výkres desky výkonových spínačů

Příloha 3: Obsah přiloženého CD