

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**  
**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Stolní rázový generátor**

**vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.**

**2014**

**autor: Bc. Michal Singer**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Michal SINGER  
Osobní číslo: E12N0143P  
Studijní program: N2644 Aplikovaná elektrotechnika  
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika  
Název tématu: Stolní rázový generátor  
Zadávající katedra: Katedra elektroenergetiky a ekologie

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

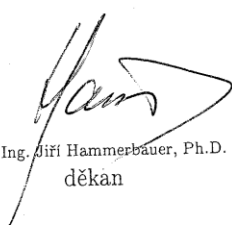
1. Navrhněte systém spouštění generátoru - trigatron.
2. Proveďte teoretický rozbor problematiky zkoušek rázovou vlnou s ohledem na nové normy.
3. Upravte stávající stolní rázový generátor.
4. Zkonstruujte spouštěcí trigatron.
5. Navrhněte výstupní obvod pro modelaci rázového resp. spínacího impulsu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


1. Mentlík, V., Trnka, P., Trnková, M., Šašek, L. : Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN, 2011, 120 s., ISBN 978-80-7300-412-5
2. Mentlík, V., Polanský, R., Pihera, J., Prosr, P., Trnka, P. : Diagnostika elektrických zařízení, ISBN 978-80-7300-232-9, BEN technická literatura Praha, 2008
3. Elektronické informační zdroje

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013  
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014

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



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce umožňuje seznámení s rázovými generátory jako testovacími zařízeními. Jejím cílem je objasnění základní problematiky spojené s rázovými vlnami napětí a se spouštěcím mechanismem typu trigatron. Diplomová práce uvádí dnešní používané druhy rázových generátorů a zkoušek s jejich zkušebními postupy na testované objekty. Dále uvádí návrh výstupního modelujícího obvodu pro normalizovaný spínací impuls. Závěr této práce je soustředěn na návrh a konstrukci samotného rázového generátoru s napájecím obvodem a spouštěcím prvkem trigatron.

## **Klíčová slova**

Rázový generátor, trigatron, elektrický přeskok, elektrický průraz, atmosférické impulzní napětí, spínací impulzní napětí, spouštěcí elektroda, násobič napětí.

## **Abstract**

The diploma thesis introduces the lightning impulse generator impact-generators as a testing facility. Its aim is to clarify the basic issues associated with impact-wave voltage and with the trigger mechanism trigatron. The thesis presents today used types of impact-generators and tests with the testing methods related to tested objects. It also describes design of output modeling circuit for normalized switching impulse. The conclusion of this work is focused on the design and construction of the impulse generator itself with power circuit and triggering element trigatron.

## **Key words**

Impulse generator, trigatron, flashover voltage, breakdown, lightning impulse, switching impulse, trigger electrode, voltage multiplier.

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pod odborným dohledem vedoucího diplomové práce pana Doc. Ing. Pavla Trnky, Ph.D., a pramenů uvedených v seznamu, které jsou součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 24. 4. 2014

Bc. Michal Singer

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za užitečné rady a poskytnuté konzultace ohledně tvorby diplomové práce. Poté bych rád poděkoval za užitečné informace a možnosti prostorů vhodných pro konstrukci diplomové práce paní Doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D.

## OBSAH

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD DO PROBLEMATIKY PULZNÍHO NAMÁHÁNÍ.....</b>	<b>11</b>
<b>1. RÁZOVÁ VLNA A SPÍNACÍ IMPULZ.....</b>	<b>13</b>
1.1. ATMOSFÉRICKÉ IMPULZNÍ NAPĚTÍ.....	14
1.2. SPÍNACÍ IMPULZNÍ NAPĚTÍ.....	15
<b>2. ZKOUŠEBNÍ POSTUPY.....</b>	<b>17</b>
2.1. ZKOUŠKY STEJNOSMĚRNÝM NAPĚTÍM.....	17
2.1.1. ZKOUŠKY VÝDRŽNÝM NAPĚTÍM.....	17
2.1.2. ZKOUŠKY NAPĚTÍM PRŮRAZNÉHO VÝBOJE.....	18
2.1.3. ZKOUŠKY ZARUČENÉHO PRŮRAZNÉHO VÝBOJE.....	18
2.2. ZKOUŠKY STRÍDAVÝM NAPĚTÍM.....	18
2.3. ZKOUŠKY ATMOSFÉRICKÝMI A SPÍNACÍMI IMPULZY.....	18
2.3.1. ZKOUŠKY VÝDRŽNÝM NAPĚTÍM: POSTUP A.....	19
2.3.2. ZKOUŠKY VÝDRŽNÝM NAPĚTÍM: POSTUP B.....	19
2.3.3. ZKOUŠKY VÝDRŽNÝM NAPĚTÍM: POSTUP C.....	19
2.3.4. ZKOUŠKY VÝDRŽNÝM NAPĚTÍM: POSTUP D.....	19
<b>3. RÁZOVÝ GENERÁTOR.....</b>	<b>20</b>
3.1. GENERÁTOR KOMBINOVANÉ VLNY.....	24
3.2. TRIGATRON.....	26
<b>4. ELEKTRICKÝ VÝBOJ V PLYNECH.....</b>	<b>28</b>
<b>5. NÁVRH LABORATORNÍHO RÁZOVÉHO GENERÁTORU.....</b>	<b>29</b>
5.1. VÝSTUPNÍ OBVOD MODELUJÍCÍ TVAR SPÍNACÍHO IMPULZU.....	29
5.2. DELONŮV NÁSOBIČ.....	33
5.2.1. PRINCIP ČINNOSTI.....	34
<b>6. REALIZACE.....</b>	<b>35</b>
6.1. DELONŮV NÁSOBIČ.....	35
6.2. RÁZOVÝ GENERÁTOR.....	37
6.3. TRIGATRON.....	38
6.4. PŘIVEDENÍ STARTOVACÍHO VN IMPULZU.....	38
6.4.1. ZAPALOVACÍ CÍVKA.....	41
<b>7. ZÁVĚR.....</b>	<b>42</b>
<b>8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>45</b>
<b>9. PŘÍLOHY.....</b>	<b>47</b>



**SEZNAM SYMBOLŮ**

$\alpha$	Angeliniho parametr 1
$\alpha_1, \alpha_2$	kořeny kvadratické rovnice
$\delta$ [kg/m <sup>3</sup> ]	relativní hustota vzduchu
$\eta$	Angeliniho parametr 2
$\Theta$ [s]	Angeliniho parametr 3
$T$ [s]	časová konstanta
$\Phi$ [Wb]	magnetický tok
$X$	pomocný činitel
$a, b$	zavedení substituce
$f$ [Hz]	frekvence
$C$ [F]	elektrická kapacita
$d$ [m]	vzájemná vzdálenost elektrod
$I$ [A]	elektrický proud
$k$	zavedení substituce
$L$ [H]	indukčnost
$n$	počet stupňů
$N$ [z]	počet závitů
$p$ [Pa]	tlak
$R$ [ $\Omega$ ]	elektrický odpor
$R_m$ [H <sup>-1</sup> ]	magnetický odpor
$s$	proměnná v Laplaceovo transformaci
$t$ [s]	čas

$t_T$ [°C]	teplota
$T_1, T_2$ [s]	parametry určující tvar rázové vlny
$U$ [V]	elektrické napětí
$U_0$ [V]	maximální hodnota napětí
$U_{Rmax}$ [V]	závěrné napětí diody
$W_L$ [J]	energie magnetického pole cívky
$Z$ [ $\Omega$ ]	impedance

## ÚVOD DO PROBLEMATIKY PULZNÍHO NAMÁHÁNÍ

V posledních desetiletích se výrazně zvyšuje poptávka elektrické energie spojená s problematikou přenosu elektrickým vedením. Elektrická energie je přenášena z míst její výroby k následné spotřebě, kde vzdálenosti často překračují stovky kilometrů. To vede snahu o lepší využití přenosu, protože rozsáhlé aglomerace budou potřebovat stále větší množství přiváděné energie. Přenos elektrické energie se provádí zejména pomocí vysokonapěťového střídavého systému elektrického vedení a jeho vývoj směřuje ke stálému zvyšování napětí. Dnes jsou již v provozu linky ultra vysokého napětí 1150 kV. Důvodem je částečná eliminace provozních ztrát. Řešením problému by v budoucnu mohlo být nalezeno v uplatnění stejnosměrného přenosu, který umožňuje snížit některé technické a ekonomické problémy doprovázející střídavý přenos. Problémy jsou především stabilita chodu elektrických soustav, velké zkratové výkony a nutnost kompenzace parametrů přenosu. Podzemní a podmořské kabely se již pro stejnosměrný přenos běžně používají. [4]

Izolace střídavého i stejnosměrného přenosu je dimenzována na danou napěťovou hladinu a její rozměry jsou určeny velikostí provozního napětí. Normální provozní napětí nenarušuje stav izolačního systému. K tomu dochází pouze za zvláštních podmínek, kdy může dojít vlivem znečištění elektrického zařízení či samostatného vedení k poruše. Napětí, které ovšem výrazně namáhá izolační systémy vedení, je typu různých přepětí, která mohou mít vnitřní či vnější původ. Poruchy, které mohou vzniknout a narušovat přenos elektrické energie na vedení a jejich rozvodech, jsou často doprovázeny přechodnými ději. Tato práce se soustřeďuje na dva druhy přechodných dějů spojené s účinky úderu blesku a spínáním. V těchto případech může amplituda napětí výrazně překročit maximální provozní napětí. Přechodné děje se přenášejí jako napěťové vlny vedení a vyznačují se oscilačním charakterem. Amplituda napětí úderu blesku je velká řádově stovky či tisíce kilovoltů s hodnotou proudu desítek kiloampér. Možná porucha typu přepětí vlivem spínání souvisí s provozním napětím a impedancí systému. Zde nárůst napětí není tak strmý jako při prvním zmiňovaném přechodném dějem, ale je také velmi nebezpečný vůči izolačním systémům, zejména v přenosové soustavě. Nejvíce se projevuje na hladině 400 kV, kde se jako izolační médium často využívá vzduch. I když se tyto dva druhy přepětí výrazně liší, dají se relativně snadno nasimulovat. Elektrická zařízení musí odolat nejen jmenovitému napětí, které odpovídá nejvyššímu napětí určitého systému, ale i přepětí. Vlivem vývojové fáze před

uvedením elektrického zařízení do provozu se testuje, zda bude schopen tato napětí vydržet. Velikost a typ zkušebního napětí závisí na jmenovitém napětí elektrického zařízení.

Úkolem vysokonapětových laboratoří je dnes nejenom měření elektrické pevnosti izolačních materiálů, ale i zkoumání vlivu přepětí na izolaci, studium nejrůznějších elektrických výbojů v točivých strojích, průchodkách, vypínačích, transformátorech, kabelech a mnoha dalších zařízení daných napětových hladin. Základem těchto VN a VVN laboratoří jsou vysokonapětové zdroje, do kterých patří i rázový generátor. Tímto zkušebním prvkem pomocí předepsaných zkušebních napětí se ověřuje, zda testovaný prvek odpovídá elektrickým zkouškám a dále se využívá k sestavení rázových charakteristik.

# 1 RÁZOVÁ VLNA A SPÍNACÍ IMPULZ

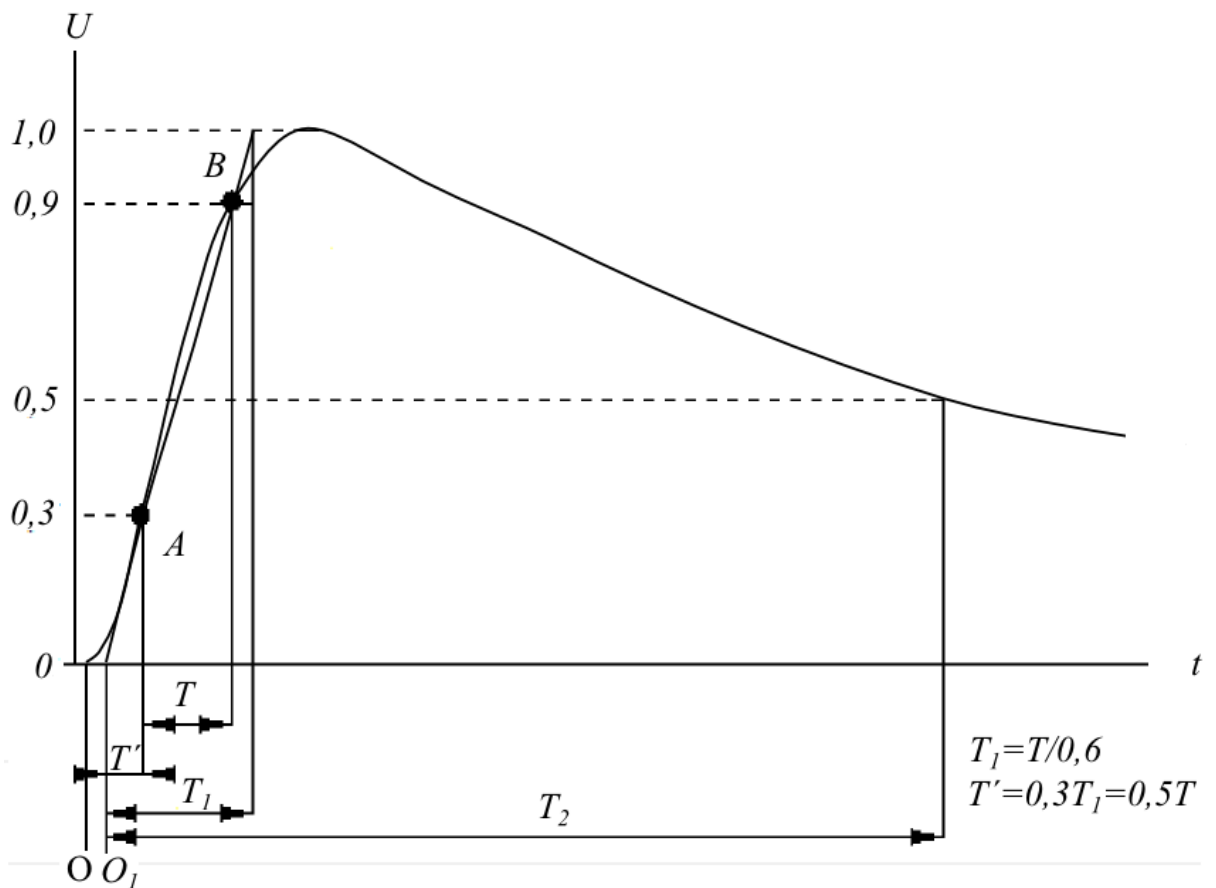
Rázové elektrické namáhání má charakter elektrického přepětí vyvolané zejména atmosférickými výboji a spínacím přepětím. Rázovým elektrickým napětím se rozumí napětí aperiodického průběhu tvaru vlny. Podle typu zkoušky se využívá tvar vlny podobající se spínací vlně přepětí, nebo rázové vlně přepětí, připomínající atmosférický výboj. Rázovou vlnu norma definuje jako přechodnou vlnu elektrického proudu, napětí nebo výkonu, která se šíří vedením, nebo po obvodu, a je charakteristická rychlým nárůstem s pomalejším poklesem. K těmto druhům zkoušek izolace na elektrickou pevnost se rázová napětí získávají rázovými generátory. Tvar rázové vlny má velký vliv na elektrickou pevnost daného izolantu. Podle skupenství izolantu, v němž došlo k výboji, se rozeznává elektrický průraz či elektrický přeskok. Elektrickým průrazem se rozumí elektrický výboj, který nenávratně poškodil izolační schopnost daného materiálu. Elektrický přeskok nastává u kapalných a plyných izolantů, kde na rozdíl od elektrického průrazu se po elektrickém výboji těmto izolantům po odeznění elektrického výboje obnovuje zpět jejich elektrická pevnost a dochází tak k samočinnému obnovení izolace materiálu. Elektrická pevnost je charakterizována nejmenším tzv. průrazným napětím způsobující na zařízení průraz či přeskok. Doba namáhání je nejvýznamnějším parametrem elektrické pevnosti. Pro měření a zkoušení parametrů izolace mají rázové vlny určité parametry. [1]

Rázová vlna napětí je vlna jednosměrná se strmým vzrůstem na maximální napětí a pomalejším poklesem zpět na nulovou hodnotu. Oblast, kde napětí vzrůstá se nazývá čelo vlny a oblast s klesajícím napětím je týlem vlny. Důležitým parametrem je tvar vlny, který je charakterizován dobou čela a dobou půltýlu. Dále pak hodnotou zkušebního napětí a dobou trvání. Dobu čela představuje zdánlivý parametr určený jako  $1/0,6$  násobek intervalu mezi okamžiky, při kterých se impuls nachází v rozmezí 30 % až 90 % vrcholové hodnoty křivky zkušebního napětí [3]. Doba půltýlu je rovněž zdánlivý parametr definovaný jako časový interval rázové vlny od jejího zdánlivého či skutečného počátku, až po úpadek křivky na polovinu hodnoty zkušebního napětí. Zdánlivý počátek prezentující rázovou vlnu atmosférického přepětí určuje okamžik předcházejícímu bodu A křivky zkušebního napětí o  $0,3T_1$  (viz obr. 1.1). Skutečný okamžik rázové spínací vlny je okamžik, kdy se zaznamenaná křivka začne monotónně zvyšovat. Doba trvání rázové vlny je v řádech mikrosekund. V případě rázové vlny, která není po její dobu trvání přerušena elektrickým průrazem či

přeskokem je označována jako vlna plná. Kusá rázová vlna pak představuje rázovou vlnu, která je přerušena elektrickým průrazem či přeskokem. [1], [3]

### 1.1 ATMOSFÉRICKÉ IMPULZNÍ NAPĚTÍ

Za atmosférické impulzní napětí jsou považovány rázové vlny s dobou čela nepřekračující 20  $\mu\text{s}$ . Norma ČSN EN 60060-1 udává normalizovaný atmosférický impulz napětí, který je popsán jako impulz 1,2/50, kde doba čela je 1,2  $\mu\text{s}$  a 50  $\mu\text{s}$  doba půltýlu. [3]



$T_1$ .....zdánlivý parametr definovaný jako 1/0,6 násobek intervalu  $T$  mezi okamžiky, při kterých dosáhne impuls 30 % a 90 % vrcholové hodnoty křivky zkušební napětí

$T_2$ .....doba půltýlu

Obr. 1.1 Obecný tvar rázové vlny atmosférického impulzního napětí [3]

V napájecí síti se atmosférický jev, tj. blesk vytvářející rázovou napěťovou vlnu projevuje [12]:

- přímým úderem blesku do venkovního obvodu, který způsobí průchod vysokého proudu přes zemní odpor, či průchodem impedancí venkovního obvodu a tím vzniku přepětí
- nepřímým úderem blesku, který vytváří elektromagnetické pole, které indukuje napětí či proudy na vodičích
- průchod zemního proudu blesku, který je následkem přímého zemního výboje do společné zemní cesty uzemňovacího systému instalace

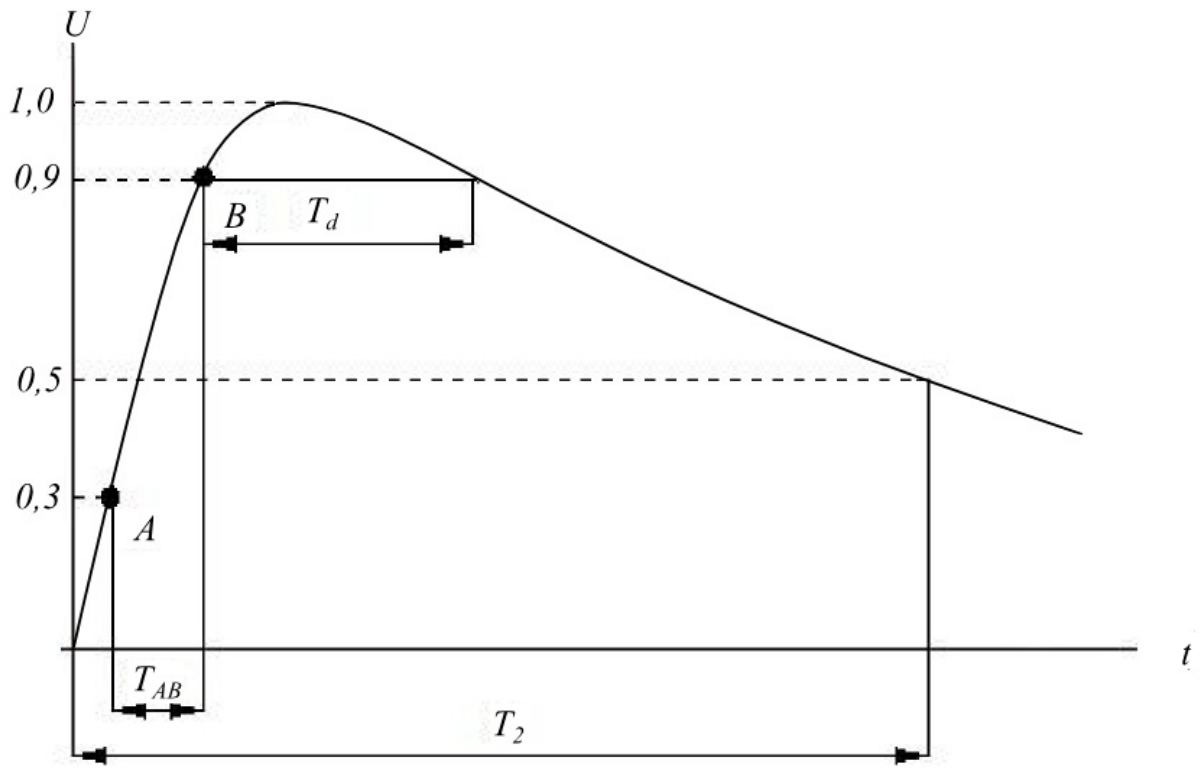
Tab. 1.1: Tolerance atmosférické vlny [3]

Hodnota zkušební napětí	±3 %
Doba čela	±30%
Doba půltýlu	±20 %

## 1.2 SPÍNACÍ IMPULZNÍ NAPĚTÍ

Spínací vlna se liší od vlny atmosférického úderu blesku dobou trvání, které je podstatně delší, v řádech stovek až tisícovek mikrosekund. Lze tvrdit, že doba čela převyšující 20  $\mu$ s je již považována za vlnu spínací [3]. Spínací přechodné jevy v napájecí síti mohou být spojeny s [12]:

- významnými spínacími rušeními, jako je spínání kondenzátorové baterie
- podružnými spínacími činnostmi nebo změnami zátěže v distribučních sítích
- rezonančními obvody ve spojení se spínacími prvky
- síťovými poruchami



$T_d$ .....doba nad 90 %, tj. časový interval, během kterého spínací impulzní napětí přesahuje hodnotu 90 % jeho maximální hodnoty

Obr. 1.2 Obecný tvar rázové vlny spínacího impulzního napětí [3]

Spínací rázové vlny jsou dominantním faktorem pro návrh izolace VVN a ZVN systémů. Objevující se tvary spínacích vln v elektrických soustavách se velmi liší, ale ze zkušeností získaných z několika let ukázaly, že nejnižší výdržné napětí pro přeskok napětí je s dobou růstu 100 až 300 mikrosekund [1]. Normalizovaný spínací napěťový impulz dle ČSN EN 60060-1 je 250/2500, avšak místo doby čela, který definuje impuls atmosférický, je zde zavedena doba do vrcholu. Doba do vrcholu je časový interval od skutečného počátku do doby maximální hodnoty spínacího impulzního napětí. [3]



Tab. 1.2: Tolerance spínací vlny [3]

Hodnota zkušební napětí	$\pm 3 \%$
Doba do vrcholu	$\pm 20\%$
Doba půltýlu	$\pm 60 \%$

## 2 ZKUŠEBNÍ POSTUPY

Zkušební napětí se získává nejčastěji pomocí transformátorů. U zkoušek stejnosměrných jsou transformátory navíc doplněny usměrňovači. Charakteristika zdroje je úzce spjata s typem zkoušeného objektu a se zkušebními podmínkami. Zkoušky se provádějí stejnosměrným, či střídavým zkušebním napětím. Tolerance činitele vlnění u zkoušek stejnosměrných je maximálně 3 %. U zkoušek stejnosměrných i střídavých s dobou trvání nepřekračující 60 sekund, je povolena odchylka od stanovené hodnoty zkušební napětí  $\pm 1 \%$ . Zkoušky překračující 60 sekund mají dovolené rozmezí  $\pm 3 \%$  od určené hladiny v průběhu zkoušky. [3]

V následujícím textu jsou uvedeny vybrané typy zkoušek vysokým napětím.

### 2.1 ZKOUŠKY STEJNOSMĚRNÝM NAPĚTÍM

#### 2.1.1 ZKOUŠKY VÝDRŽNÝM NAPĚTÍM

Na zkoušený objekt je přikládáno zkušební napětí nízké hodnoty. Důvodem je zamezení vzniku přepětí v důsledku spínacího přechodového jevu. Napětí se postupně zvyšuje na hodnotu odpovídající 75 % hodnoty zkušební napětí. Poté se zkušební napětí doporučuje zvyšovat přibližně 2 % U za sekundu. Není-li stanoveno příslušnou technickou komisí jinak, tak trvání výdržné zkoušky je 60 sekund. Jestliže na zkoušeném objektu nedojde k průraznému výboji, jsou splněny požadavky této zkoušky. [3]

### 2.1.2 ZKOUŠKY NAPĚTÍM PRŮRAZNÉHO VÝBOJE

Příslušná technická komise stanovuje rychlost zvyšování napětí, počet přiložení napětí a postup vyhodnocení zkoušky. Obdobně jako u zkoušek výdržným napětím i zde je přiložené napětí zvyšováno do okamžiku, kdy dojde k průraznému výboji - tato hodnota napětí musí být zaznamenána. Následně se toto opakuje podle zkušebního postupu určeného technickou komisí. [3]

### 2.1.3 ZKOUŠKY ZARUČENÉHO NAPĚTÍ PRŮRAZNÉHO VÝBOJE

Napětí je opět plynule zvyšováno až do případu, kdy dojde k průraznému výboji na zkoušeném objektu. Požadavek zkoušek je splněn tehdy, když je soubor posledních zaznamenaných hodnot zkušebního napětí menší v okamžiku průrazného výboje, než zaručené napětí průrazného výboje. Příslušná technická komise stanovuje počet přiložení napětí a rychlost jeho zvyšování. [3]

## 2.2 ZKOUŠKY STRÍDAVÝM NAPĚTÍM

Kmitočet zkušebního napětí se musí nacházet v intervalu od 45 Hz do 60 Hz, pokud příslušná technická komise pro zvláštní zkoušky nestanoví jinak. Tvar napětí musí být podobný sinusovému průběhu s rozdílem amplitud kladných a záporných hodnot menších než 2 %. Dále se druhy zkoušek včetně jejich postupů shodují se zkouškami stejnosměrným napětím. [3]

## 2.3 ZKOUŠKY ATMOSFÉRICKÝMI A SPÍNACÍMI IMPULZY

Tolerance hodnot normalizovaných impulzů jsou uvedeny v tabulkách Tab. 2. 1 a Tab. 2. 2. Pro oba případy se provádějí zkoušky výdržným napětím. Rozeznáváme čtyři druhy zkušebních postupů, označované jako postup A, B, C, D. [3], [13]

### 2.3.1 ZKOUŠKY VÝDRŽNÝM NAPĚTÍM: POSTUP A

Tento postup je vhodný pro zkoušky degradovaného typu a pro samočinně neobnovující izolace. Zkoušený objekt je testován pomocí tří impulzů, které se na něj přikládají. Impulzy mají určený tvar i polaritu a jsou na hladině stanoveného výdržného napětí. Nedojde-li k poruše, jsou splněny požadavky zkoušky. Způsob zjištění poruchy zkoušeného objektu stanovuje příslušná technická komise. [3]

### 2.3.2 ZKOUŠKY VÝDRŽNÝM NAPĚTÍM: POSTUP B

Zkoušený objekt je vystaven patnácti impulzům stanoveného tvaru a polarity na hladině stanoveného výdržného napětí. Požadavky zkoušky jsou splněny, jestliže nedojde více než ke dvěma průrazným výbojům v oblasti samočinně se obnovující izolace a není-li zjištěna porucha v samočinně se neobnovující oblasti izolace. Jako znamení, že nedošlo k poruše v samočinně se neobnovující izolace, je pokud poslední tři impulzy nezpůsobily průrazný výboj. V případě, že k průraznému výboji došlo třináctým až patnáctým impulzem, se můžou přiložit další tři impulzy. Pokud se nevyskytne žádný průrazný výboj v těchto dodatečných impulzech, jsou splněny požadavky zkoušky. [3]

### 2.3.3 ZKOUŠKY VÝDRŽNÝM NAPĚTÍM: POSTUP C

Obdobně jako u postupu typu A jsou přikládány tři impulzy stanoveného tvaru a polarity na stanovené hladině výdržného napětí. Zkoušený objekt vyhověl, jestliže nedošlo k průraznému výboji. Při zjištění jednoho či více průrazných výbojů, zkoušený objekt nevyhověl. Při indikaci jednoho průrazného výboje v oblasti samočinně se obnovující izolace je potřeba přivést dalších devět impulzů, při kterých nesmí dojít k průraznému výboji, aby se mohl testovaný objekt považovat za vyhovující. Jestliže se zjistí během jakékoliv části zkoušky, že došlo k průraznému výboji v oblasti samočinně se neobnovující izolace, zkoušený objekt je nevyhovující. [3]

### 2.3.4 ZKOUŠKY VÝDRŽNÝM NAPĚTÍM: POSTUP D

Česká státní norma typu ČSN EN 60060-1 popisuje statistické zkušební postupy, kterými lze v případě samočinně obnovující se izolace vyhodnotit 10 % napětí průrazného výboje  $U_{10}$ . Příslušná technická komise stanovuje předpokládanou hodnotu pro směrodatnou odchylku napětí průrazného výboje. Požadavek zkoušky je splněn tehdy, není-li  $U_{10}$  menší než stanovené výdržné impulzní napětí. [3]

Uvedené zkoušky se provádí na vzorcích z pevné izolace, izolačních kapalin nebo jejich kombinací. Pro dielektrické zkoušky nad 100 kV na venkovní samočinně obnovující se izolaci. [3]

Jiné normy související také s problematikou rázového impulsu a zkoušek jsou následující:

- ČSN EN 62068 Elektroizolační materiály a systémy - Obecné metody hodnocení elektrické odolnosti při opakovaných napěťových impulsích
- IEEE 4-2013 - Standard for High-Voltage Testing Techniques
- ČSN EN 60076-3 Výkonové transformátory – Část 3: Izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdušné vzdálenosti

### 3 RÁZOVÝ GENERÁTOR

Historie rázového generátoru spadá takřka na začátek 20. století, kdy Erwin Otto Marx popsal a zkonstruoval elektrický obvod generující vysokonapěťové impulzy k účelu nasimulování účinků úderů blesků do elektrického vedení. Tehdy toto zařízení bylo označováno jako Marxův generátor a dodnes si drží takřka stejnou koncepci. [10]

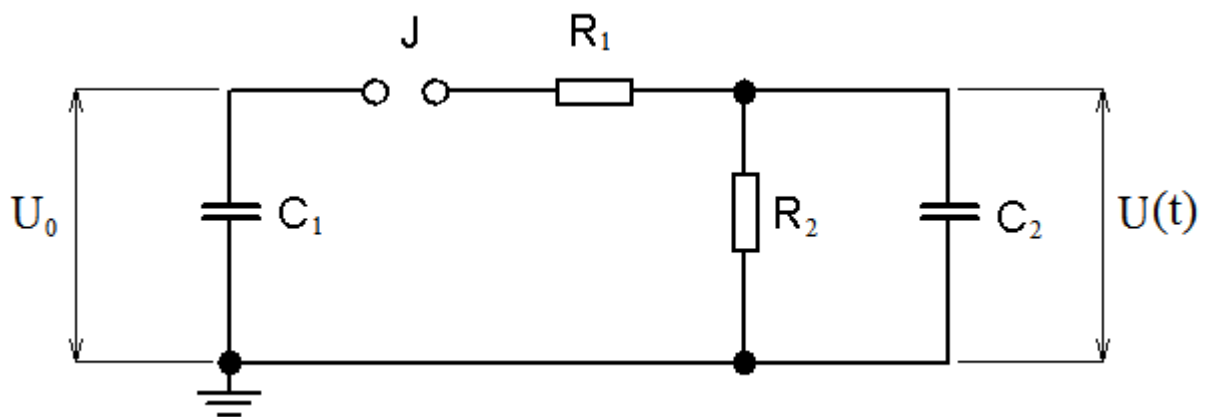
Výstupní napětí rázového generátoru je obecně dáno počtem stupňů a volbou nabíjecího zařízení. Vysokonapěťové i proudové impulzy vysokých hodnot jsou užívané nejen v elektrotechnice, ale i v řadě fyzikálních experimentů, do kterých lze zařadit technické aplikace, jako jsou lasery, termonukleární fúze, či zařízení pracující nebo produkující vysoko ionizovaný plyn, často označován jako čtvrtý druh skupenství plazma.

Zkušební generátory a jejich charakteristiky jsou takové, aby se co možno nejvíce podobaly výše uvedeným stavům, jak pro spínací, tak i pro atmosférické jevy.

Generátory vysokého napětí se používají ve zkušebních laboratořích, kde slouží k testování zařízení, jako jsou transformátory, kabely, rozvaděče, průchodky atd. Zkoušky by měly potvrdit či vyvrátit funkčnost zařízení. Zařízení v praxi pracují v nejrůznějších pracovních podmínkách a je tedy nutné studovat chování izolačního systému v podmínkách,

ve kterých se může ocitnout. Amplitudy a typy přístrojů pro testování jsou předepsány v normách zabývající se touto problematikou.

Obecně jsou známy dva druhy zapojení. Jednostupňové rázové generátory se obvykle často nevyskytují v rázových generátorech individuálně, ale tvoří jednotlivé stupně několikastupňových rázových generátorů. Takovéto jednostupňové rázové generátory mohou být nabíjeny napětím v rozsahu jednotek kV až do 1 MV [1]. Uvedené obrázky (obr. 3.1 a obr. 3.2) zobrazují možné druhy zapojení jednostupňového rázového generátoru.



$C_1$ .....nabíjecí/vybíjecí kondenzátor

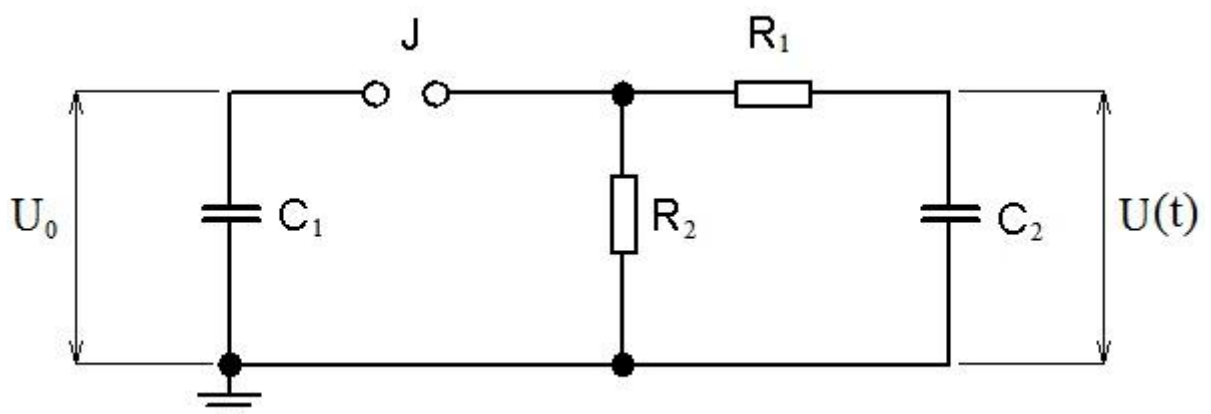
$R_1$ .....tzv. čelní rezistor

$C_2$ .....zatěžovací kondenzátor

$R_2$ .....tzv. tylní rezistor

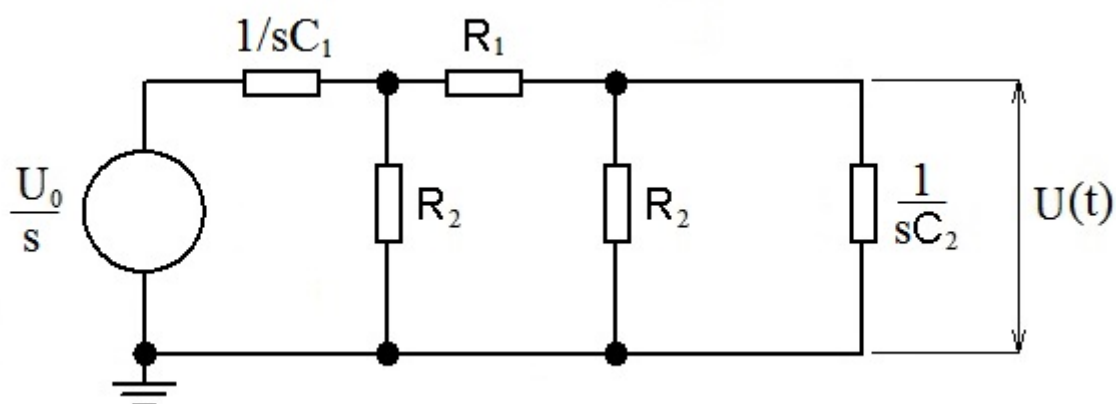
$J$ .....jiskřiště

Obr. 3.1 Schéma jednostupňového rázového generátoru [2]



Obr. 3.2 Další možné zapojení jednostupňového rázového generátoru [2]

Uvedený obrázek (obr. 3.3) je ekvivalentním zapojením vhodným pro Laplaceovu transformaci.



s.....proměnná v Laplaceově transformaci

Obr. 3.3 Ekvivalentní schéma obvodu (obr. 3.2) pro analýzu Laplaceovy transformace [2]

Výstupní napětí obvodu (obr. 3.1) je dáno výrazem [2]:

$$U(t) = \frac{U_0}{s} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (3.1)$$

kde  $Z_1$  a  $Z_2$  jsou impedance, které jsou ve tvaru:

$$Z_1 = \frac{1}{C_1 s} + R_1; \quad (3.2)$$

$$Z_2 = \frac{R_2 / C_2 s}{R_2 + 1 / C_2 s}. \quad (3.3)$$

Zavedení substituce

$$U(t) = \frac{U_0}{k} \frac{1}{s^2 + as + b}, \quad (3.4)$$

kde byly zavedeny konstanty  $a$ ,  $b$  a  $k$  pro lepší přehlednost výpočtů

$$a = \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \right); \quad (3.5)$$

$$b = \left( \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right); \quad (3.6)$$

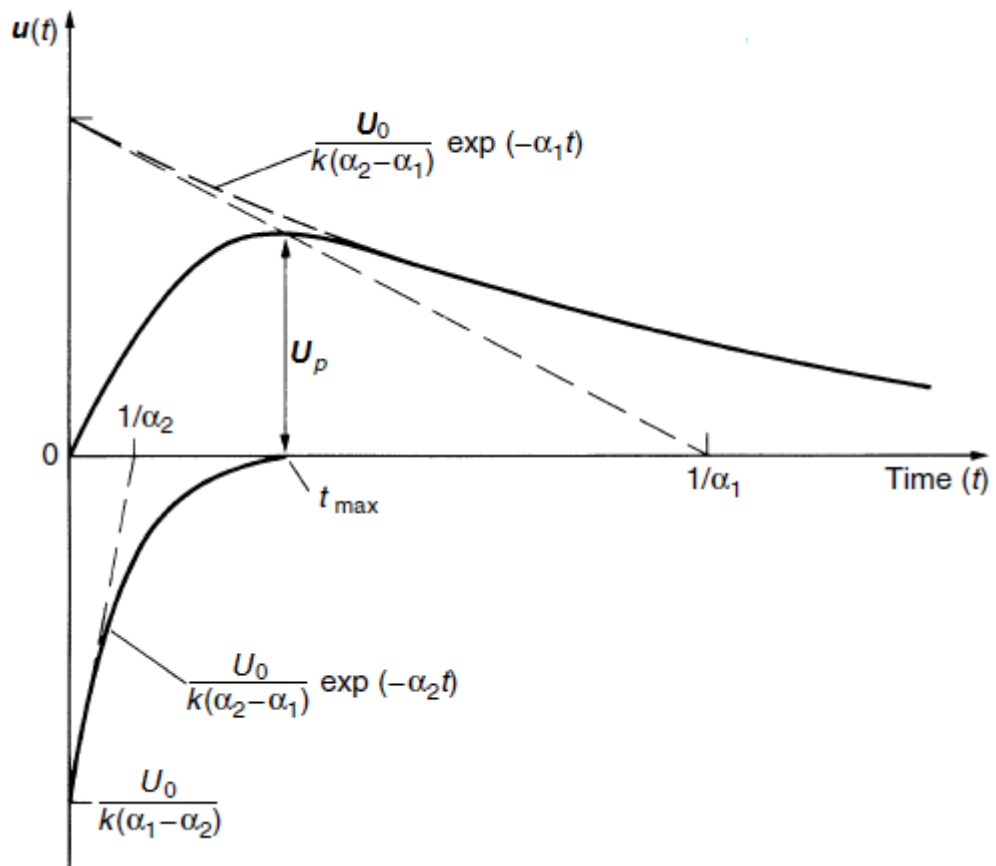
$$k = R_1 C_2. \quad (3.7)$$

Výstupní napětí pro daný elektrický obvod je potom:

$$U(t) = \frac{U_0}{k} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad (3.8)$$

$\alpha_1, \alpha_2, \dots$  jsou kořeny kvadratické rovnice  $s^2 + as + b = 0$ .

Tvar vlny výstupního napětí je složen z dvou exponenciálních funkcí.



Obr. 3.4 Tvar napěťové vlny výstupního napětí v časové oblasti (převzato z [2])

U vícestupňových generátorů, kde se vyskytuje řada kondenzátorů nabíjejících se přes odpory s vysokou ohmickou hodnotou, se nabíjení kondenzátorů uskutečňuje paralelně. Při vybíjení kondenzátorů již elektrickými odpory žádná elektrická energie neprochází. Elektrická energie prochází skrze jiskřiště, která mají v době elektrického přeskočů výrazně menší elektrický odpor, než zapojené rezistory. Nabíjecí odpory nemají zřetelný vliv na tvar

rázové vlny. Vybíjení je již sériového charakteru a začíná tehdy, když vlivem nabíjení kondenzátorů dojde k přeskoku na prvním tzv. zapalovacím jiskřišti. Na následném jiskřišti se objeví přepětí, které vytvoří podmínky pro další elektrický přeskok a za ním následují další zapálení jiskřišť až ke konečnému spínacímu jiskřišti, přes které se nabije zatěžovací kapacita na napětí blízkému součinu napájecího napětí a počet stupňů rázového generátoru. Výsledná činná kapacita je násobkem počtem stupňů rázového generátoru a dílčí kapacity. Výsledná činná kapacita by měla být také několikrát větší, než kapacita zatěžová definující zkoušený předmět. Nabíjení jednotlivých stupňů se neprovádí stejnosměrně vlivem nabíjecích odporů. Nabíjecí napětí klesá se zvyšujícími se stupni. Teprve po určité časové prodlevě se napětí na všech nabíjených kondenzátorech vyrovná na stejnou hodnotu. [1]

### 3.1 GENERÁTOR KOMBINOVANÉ VLNY

Podle toho zda se zdroj rušení nachází či nenachází v napájecí síti, tak se generátor simuluje jako zdroj s nízkou či vyšší impedancí na vstupech či výstupech zkoušeného zařízení. Tento generátor umožňuje měnit výstupní impedanci a nazývá se generátorem kombinované vlny. Vlny jsou specifikovány jako napětí naprázdno a proud nakrátko. Norma definuje dva typy tohoto generátoru. Generátor kombinované vlny 10/700  $\mu\text{s}$  a 1,2/50  $\mu\text{s}$ . První typ se používá pro zkoušení vstupů/výstupů určených pro připojení symetrických komunikačních vedení a generuje rázový impulz, který má náběžnou dobu napětí naprázdno 10  $\mu\text{s}$ , dobu půltýlu napětí naprázdno 700  $\mu\text{s}$  a doby proudů nakrátko 5  $\mu\text{s}$  a 320  $\mu\text{s}$ . Pro ostatní případy je vhodný generátor druhého typu, zejména pro zkoušení vstupů/výstupů určených pro připojení napájecích vedení a krátkých signálních vedení, který generuje napěťovou vlnu v časech 1,2/50  $\mu\text{s}$  a proudovou vlnu v 8/20  $\mu\text{s}$ . [12]



Tab. 3.1: Definice parametrů vlny 1,2/50  $\mu\text{s}$  a 8/20  $\mu\text{s}$  [12]

Definice	Podle IEC 60060-1		Podle IEC 60469-1	
	Nábežná doba $\mu\text{s}$	Doba na poloviční hodnotu $\mu\text{s}$	Doba náběhu (10 % - 90 %) $\mu\text{s}$	Doba trvání (50 % - 50 %) $\mu\text{s}$
<b>Napětí naprázdno</b>	1,2 $\pm$ 30 %	50 $\pm$ 20 %	1 $\pm$ 30 %	50 $\pm$ 20 %
<b>Proud nakrátko</b>	8 $\pm$ 20 %	20 $\pm$ 20 %	6,4 $\pm$ 20 %	16 $\pm$ 20 %

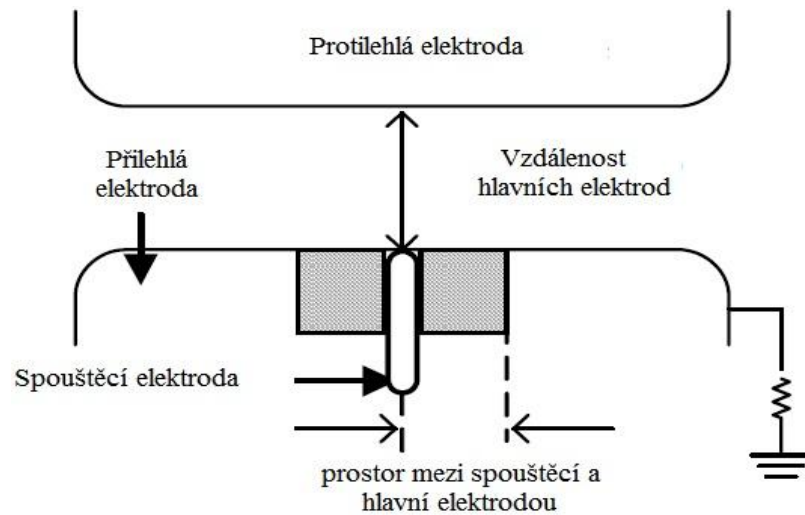
Tab. 3.2: Definice parametrů vlny 10/700  $\mu\text{s}$  – 5/320  $\mu\text{s}$  [12]

Definice	Podle souboru ITU-T K a podle IEC 60060-1		Podle IEC 60469-1	
	Nábežná doba $\mu\text{s}$	Doba na poloviční hodnotu $\mu\text{s}$	Doba náběhu (10 % - 90 %) $\mu\text{s}$	Doba trvání (50 % - 50 %) $\mu\text{s}$
	<b>Napětí naprázdno</b>	10 $\pm$ 30 %	700 $\pm$ 20 %	6,5 $\pm$ 30 %
<b>Proud nakrátko</b>	5 $\pm$ 20 %	320 $\pm$ 20 %	4 $\pm$ 20 %	300 $\pm$ 20 %

Izolace zkušence nemusí vydržet rázové namáhání a může dojít k výboji, tj. ke stavu, kdy napětí rychle a velmi prudce poklesne na nulovou hodnotu. V takovém případě se jedná o kusou vlnu. V případě, že k výboji nedojde, znamená to, že vlna není přerušena přeskokem ani průrazem, a poté je tato vlna označována jako plná vlna. Výsledkem měření jsou rázové charakteristiky, které udávají závislost vrcholových hodnot na době, v jejímž okamžiku dojde k výboji (doba trvání kusé vlny). Rázové charakteristiky se získají měřením stejné polarity napětí, stejným tvarem vlny, avšak s různou vrcholovou hodnotou napětí. U vyšších vrcholových hodnot dochází k výboji dříve. Pro každou vrcholovou hodnotu napětí je třeba uskutečnit alespoň dvacet výbojů, z jejichž hodnot se provede střední hodnota.

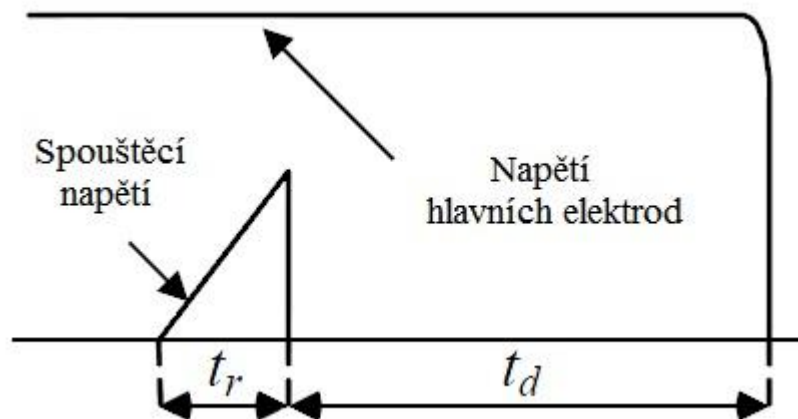
### 3.2 TRIGATRON

Trigatron je dnes již ne zcela úplně běžné zařízení, které umožňuje ovládat vysoké napětí a proudy. Běžně jde o desítky kilovolt a desítky kiloampér. Spínač typu trigatron je složen ze tří elektrod. Dvě hlavní elektrody určené pro vedení proudu a pomocné ovládací elektrody. Napětí mezi hlavními elektrodami nesmí přesahovat zapalovací napětí. Hodnota zapalovacího napětí závisí na typu izolačního média a na vzájemné vzdálenosti hlavních elektrod. Tento systém může být i zapouzdřený v keramickém či skleněném pouzdře. Izolačním médiem může být například vzduch, vodík, argon, různé směsi plynů, ale i minerální oleje použité jako dielektrikum. Existují dva typy trigatronu, jiskřiště s oddělenou spouštěcí elektrodou a jiskřiště se spouštěcí elektrodou uvnitř hlavní elektrody tvořící katodu (obr. 3.5). Kladná elektroda již nemusí být nijak konstrukčně upravena pro vložení takového pomocné elektrody. Materiálem hlavních elektrod bývají slitiny bronzu, mědi a wolframu. Právě zmiňované materiály resp. jejich slitiny při výskytu elektrického oblouku doprovázeným vysokými teplotami zamezují postupnému odpařování materiálů hlavních elektrod. Ve srovnání s jinými spínacími prvky jako jsou třeba vakuové spínače a různé polovodičové spínače, může jiskřiště složené ze tří elektrod utvářející trigatron vyhovovat požadavkům stabilního pracovní napětí a rychlého proudového nárůstu [18]. Jeho použití je tedy vhodné v podmínkách, kdy je pracovní stabilita důležitější než časové zpoždění spínacího prvku. Trigatron lze sepnut tehdy, když je na řídicí elektrodu přiveden vysokonapěťový impulz, který ionizuje prostředí mezi katodou a ovládací elektrodou. Tím dochází k vytvoření výboje, který vytváří ultrafialové záření generující volné elektrony v určitém prostoru a vytvářejí tak podmínky pro přeskok. Tím elektrický oblouk překonává elektrický odpor mezi hlavními elektrodami a vytrvává, dokud napětí neklesne pod určitou hodnotu. Tento způsob vyžaduje delší čas k vytvoření oblouku, ale charakterizuje se delší životností spínače s nižší erozí. Druhý, rychlejší způsob sepnutí nastane, když je na řídicí elektrodu přiveden takový vysokonapěťový impulz, kde přeskok prvně překonává mezeru od řídicí elektrody k protější elektrodě. Poté se zhroutlí prostor hlavní mezery a spínač je opět sepnut. Nevýhodou tohoto spínání je generování velkého přepětí, které působí na řídicí elektrodu. Návrh trigatronu je poměrně jednoduchý a řadí se k nejlevnějšímu typu řešení napájení vysokonapěťových obvodů. [9]



Obr. 3.5 Struktura spínacího prvku typu trigatron se spouštěcí elektrodou uvnitř hlavní elektrody [9]

Z hlediska časů u obou typů spínání trigatronu potřebných k prolomení izolační pevnosti vzduchu hlavních elektrod je lze rozdělit do dvou částí: dobou náběhu napětí řídicí elektrody a dobou, kdy dojde k hlavnímu výboji mezi anodou a katodou. [9]



Obr. 3.6 Časové zpoždění trigatronu [9]

Tento čas je dán vztahem:

$$T = T_r + T_d. \quad (3.9)$$

Pro rychlejší způsob sepnutí platí, že  $T_d \ll T_r$  a pro postup, kdy musí nejprve k ionizaci a k následnému uvolnění volných elektronů  $T_d > T_r$ .

Toto jiskřiště pracuje při konstantním pracovním napětí bez poruchy jeho činnosti a také je ošetřen stav, kdy by mohlo dojít k nechtěnému hoření oblouku. Hodnota napětí, při níž by došlo k tomuto stavu je dána výrazem:

$$U_b = 6,4\sqrt{\delta d} + 24,5(\delta d). \quad (3.10)$$

Kde  $d$  představuje vzájemnou vzdálenost hlavních elektrod udanou v centimetrech,  $\delta$  je relativní hustota vzduchu. Jedná-li se o normální prostředí, tj. suchý vzduch,  $\delta$  může se spočítat následovně:

$$\delta = \frac{2,89p}{273 + t_T}, \quad (3.11)$$

kde  $t_T$  je teplota v Celsiových stupních a  $p$  je tlak v kPa.

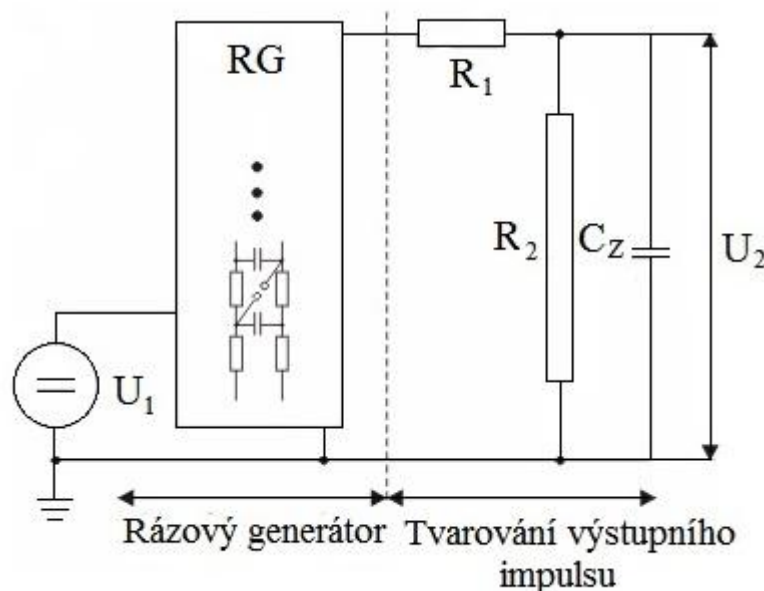
## 4 ELEKTRICKÝ VÝBOJ V PLYNECH

Plyn se skládá ze samovolně pohyblivých molekul, které jsou při normálním tlaku dostatečně vzdáleny tak, že se plyn chová jako izolant. Výboj znamená průchod elektrického proudu, což je pohyb nosičů elektrických nábojů, které se musí dostat do prostoru mezi elektrody z okolního prostoru, z elektrod, či musí vzniknout v plynu. Nosiče elektrických nábojů jsou všeobecně označovány jako ionty. Ionty vznikají za pomoci působení tzv. ionizačních činidel, které mohou být v podobě radioaktivního záření, tepelného pohybu při vysokých teplotách, elektrického pole, fotoionizací. Pohyb iontů v elektrickém poli se děje tak, že kladné ionty směřují ke katodě a záporné k anodě. Tento pohyb je složen z pohybu tepelného a pohybu vyvolaného elektrickým polem. Výboj v plynech závisí na tvaru a materiálu elektrod, na teplotě, na druhu a tlaku plynu a na napětí mezi elektrodami. Při přiložení napětí na elektrody určité velikosti, začne jimi procházet nepatrný proud, který je podmíněn působením vnějšího ionizačního činidla. Jedná se tedy o výboj, který není schopen vytrvat bez přítomnosti ionizačního činidla a je označován za výboj nesamostatný. Teprve zvyšováním napětí lze docílit nárazové ionizace, což vede k urychlení elektronů a jejich srážek s atomy. Vytvářejí se kladné a záporné ionty, což je počátek doutnavého výboje. Při

dostatečném zdroji energie přejde doutnavý výboj v elektrický oblouk, který se vyznačuje velkou proudovou hustotou s intenzivním zářením. [1], [7]

## 5 NÁVRH LABORATORNÍHO RÁZOVÉHO GENERÁTORU

### 5.1 VÝSTUPNÍ OBVOD MODELUJÍCÍ TVAR SPÍNACÍHO IMPULZU



Obr. 5.1 Ekvivalentní zapojení rázového generátoru s výstupním obvodem

Pro snazší výpočet obvodu, který modeluje tvar spínacího impulsu, se vychází z ekvivalentního zapojení rázového generátoru (obr. 5. 1). Tento obvod je charakterizován jako jednostupňový rázový generátor napětí. Kondenzátor  $C_I$  je výsledná, ekvivalentní kapacita kondenzátorů, z nichž každý má stejnou kapacitu  $C_I'$ . Série kondenzátorů se nabíjí paralelně vstupním napětím přes nabíjecí odpory. Jejich velikost je značná oproti odporům modelující tvar napěťové vlny, proto nemají znatelný vliv na tvar rázové vlny. Po nabití výsledné kapacity tj. všech kapacit, dochází k sériovému uspořádání se spínacím jiskřištěm. Tímto dochází k součtu napětí jednotlivých stupňů a kondenzátory se vybíjí do modelovacího

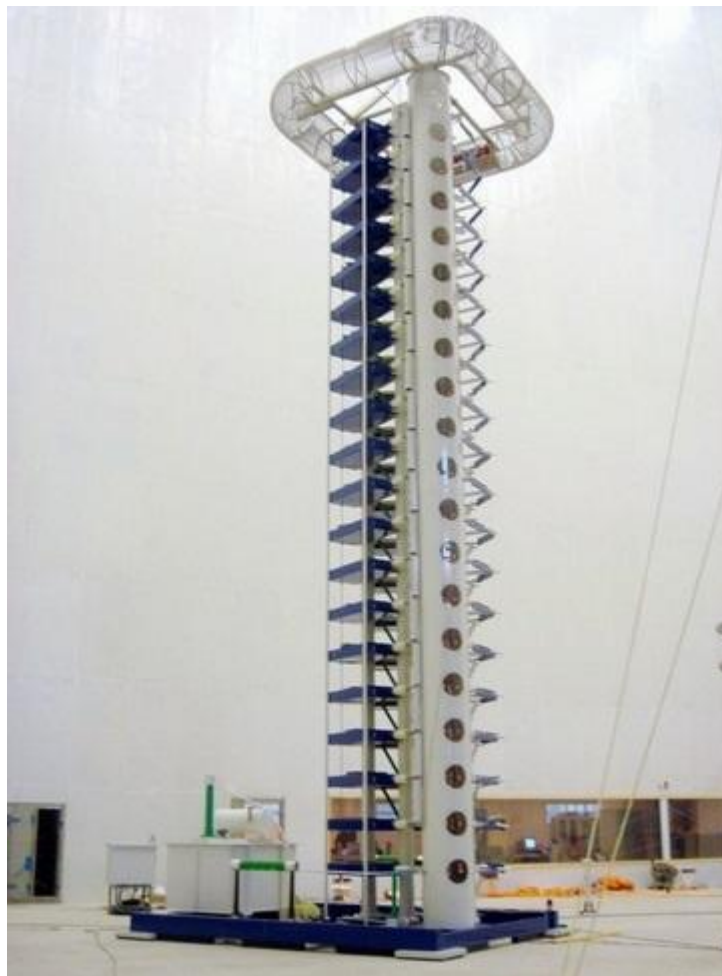
obvodu. Zatěžovací kapacita se nabíjí na napětí dané součinem, počtem stupňů a nabíjecího napětí generátoru. Napětí jednoho stupně je dáno volbou nabíjecího zařízení. [1]

$$C_1 = \frac{C'_1}{n} \quad (5.1)$$

Činná kapacita se nabíjí z Delonova násobiče napětí představující stejnosměrný zdroj, načež se vybíjí do obvodu složeného z tzv. čelního a týlového odporu a zatěžovacího kondenzátoru. Týl rázové vlny je dán napětím, které vytváří vybíjecí proud činného kondenzátoru na rezistoru tvarujícího týl vlny. Tvar čela vlny určuje zatěžovací kapacita a čelní rezistor, přes které se nabíjí činná kapacita.

Pro správný tvar odpovídající normované napěťové vlně, kterou rázový generátor přivádí na zkoušený objekt, je třeba předběžně určit jeho konstanty. Konstanty tvoří odpory a kapacity. Velikosti kapacit  $C_1$  a  $C_2$  jsou známy, takže změnou odporů lze měnit tvar vlny. Cílem je vypočítat odpory  $R_1$  a  $R_2$  pro rázový generátor, který bude vytvářet vlnu napětí odpovídajícímu normalizovanému spínacímu impulzu 250/2500. Hodnota činné kapacity  $C_1$  je 0,0367  $\mu\text{F}$ . Zatěžovací kapacita je zvolena podle technických, ekonomických a konstrukčních požadavků pro rázový generátor. Optimální poměr kapacit  $C_1/C_2 = 4$  až 10 pro čistě kapacitní objekt [1]. Uvažovaná kapacita zkoušeného objektu je vzata z optimálního poměru kapacit s velikostí 500 nF.

Mezi významné výrobce rázových generátorů na světovém trhu se řadí společnost Haefely Test AG and Hipotronics, jejíž jeden z několika nabízených typů rázového generátoru je znázorněn fotografií (obr. 5.2). Dále například společnosti Hv Hipot Electric, Neo Tele-Tronix Pvt. Ltd., W. S. Test Systems Private Limited.

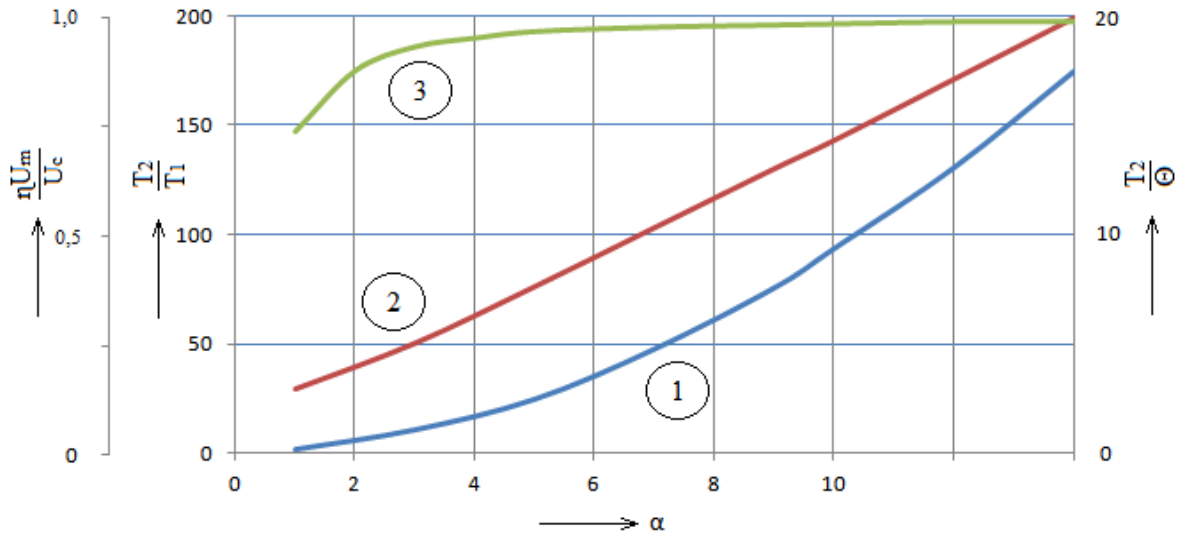


Obr. 5.2 Haefely 4000 kV, 600 kJ (převzato z [17])

Nejdříve je třeba spočítat poměr doby půltýlu a dobu čela [1]:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{2500}{250} = 10. \quad (5.2)$$

K této hodnotě lze pomocí Angeliniho křivek (obr. 5.3) určit pomocné parametry zavedené přímo pro rázové generátory, které usnadňují výpočet a výčet potřebných hodnot právě ze zmiňovaných Angeliniho křivek.

Obr. 5.3 Hodnoty  $T_2/T_1$ ,  $T_2/\theta$  a  $\eta U_m/U_c$  jako funkce  $\alpha$  [1]

Z poměru  $T_2/T_1$  je získán parametr  $\alpha$  z křivky 1, který má přibližně velikost 2,8. Křivka 2 určuje  $T_2/\theta=4,7$ . Tyto získané parametry umožňují vypočítat  $\theta$ :

$$\theta = \frac{2500}{4,7} = 53,2 \text{ [}\mu\text{s]}. \quad (5.3)$$

Pro výpočet velikosti tvarovacích odporů  $R_1$  a  $R_2$  je třeba znát ještě pomocný činitel  $X$ , který lze získat ze vztahu:

$$X = \frac{1}{\alpha^2} \left( 1 + \frac{C_1}{C_2} \right) = \frac{1}{2,8^2} \left( 1 + \frac{0,0367 \cdot 10^{-6}}{7,3 \cdot 10^{-9}} \right) = 0,7688 [-]. \quad (5.4)$$

Nyní jsou spočteny všechny potřebné hodnoty pro stanovení hodnot rezistorů:

$$R_1 = \frac{\alpha\theta}{C_1} (1 - \sqrt{1 - X}) = \frac{2,8 \cdot 53,2 \cdot 10^{-6}}{0,0367 \cdot 10^{-6}} (1 - \sqrt{1 - 0,1837}) = 2107 \text{ [}\Omega] \quad (5.5)$$

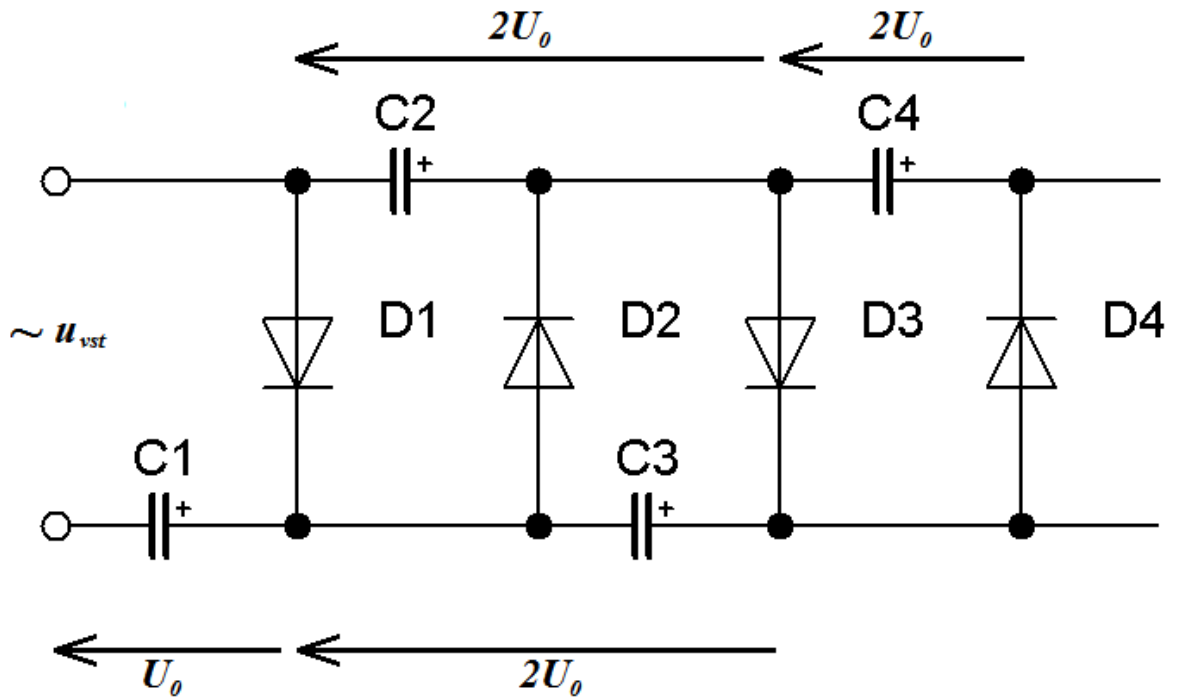
$$R_2 = \frac{\alpha\theta}{C_1 + C_2} (1 - \sqrt{1 - X}) = \frac{2,8 \cdot 53,2 \cdot 10^{-6}}{0,0367 \cdot 10^{-6} + 7,3 \cdot 10^{-9}} (1 - \sqrt{1 - 0,1837}) = 326 \text{ [}\Omega] \quad (5.6)$$



## 5.2 DELONŮV NÁSOBIČ

Pro nabíjení kapacit je použit jako napájecí zdroj kaskádní jednocestný násobič napětí tzv. Delonův násobič. Kaskádním typem násobiče je označován z důvodu opakování jednotlivých stupňů usměrňovačů tak, aby z hlediska střídavého napájení byly všechny stupně spojeny paralelně a z hlediska jejich výstupních stejnosměrných napětí v sérii. Užití násobiče napětí jako zdroj vysokého napětí je výhodnější, protože se pro velmi malé proudy a vysoké hodnoty napětí transformátorů s vysokým počtem sekundárních závitů nevyplatí konstruovat. Transformátor by musel obsahovat velké množství sekundárního vinutí tenkých závitů, což je velice pracné a zároveň se vyskytuje velké riziko vzniku mezizávitových průrazů izolace. [11]

Základ Delonova násobiče tvoří několik stupňů jednocestných usměrňovačů napětí. Jednotlivý usměrňovač je složen z usměrňovací diody a kondenzátoru. Kondenzátor je nabíjen skrze diodu propustného směru, která mění střídavé napětí na napětí stejnosměrné. Velikost napětí stejnosměrného charakteru nabitého kondenzátoru činí maximální amplitudě. V okamžiku, kdy je tato dioda polarizována závěrně, převezme tuto činnost další dioda, která je opět v propustném směru a další kapacita je nabita na napětí o hodnotě dvojnásobně větší než kapacita první. Jedná se o sériové sčítání napěťových zdrojů. Pomocí násobičů napětí lze realizovat vyšší výstupní napětí, než je schopno získat ze sekundárního vinutí transformátoru či přímo z elektrické sítě. V praxi se používají jako zdroje vysokého napětí. Sestavování jednotlivých stupňů ovšem nelze provádět do nekonečna, protože s rostoucím počtem zapojených stupňů, klesá odebíraný proud z násobiče. V takovémto případě by se jednalo o tzv. měkký zdroj napětí. Doporučený koeficient násobení tj. počet jednocestných usměrňovačů je stanoven na maximálně deset. Výhodou těchto druhů násobičů je, že mají jeden pól výstupního napětí spojený s jedním vývodem střídavého zdroje, což umožňuje tyto násobiče napájet přímo ze sítě, a lze také na výstupu zajistit zemnicí pól. [11], [12]



Obr. 5.4. Delonův násobič [11]

### 5.2.1 PRINCIP ČINNOSTI [11]

Pro vysvětlení principu Delonova násobiče napětí je stanoven předpoklad, že první půlvlna střídavého napětí je polarizována tak, že horní vývod je kladné polarity.

1. půlvlna: Dioda  $D_1$  z obr. 5.4 je v propustném směru, což umožňuje proud protékat skrze tuto diodu a kondenzátor  $C_1$ . Kondenzátor  $C_1$  se nabije na maximální hodnotu vstupního napětí, která má velikost:

$$U_0 = \sqrt{2} \cdot u_{vst}. \quad (5.7)$$

2. půlvlna: Stav, kdy v dalším časovém intervalu jsou v sérii dva napěťové zdroje (vstupní napětí  $u_1$  a nabitý kondenzátor  $C_1$ ), horní svorka je záporná vzhledem ke svorce spodní je dioda  $D_1$  v závěrném stavu, tudíž jí neprotéká žádný proud. Proud protéká diodou  $D_2$  orientovanou tak, aby tomu bylo zápornou půlperiodou umožněno a skrze kondenzátor  $C_2$ . Zdrojem napětí již není jen vstupní napětí, ale také napětí na kondenzátoru  $C_1$ . Tato dvě napětí jsou souhlasně orientována a jejich hodnoty se sčítají:

$$u_{vst} \cdot \sqrt{2} + U_0 = 2 \cdot U_0. \quad (5.8)$$

3. půlvlna: Na horní svorku je opět přiveden kladný potenciál. Dioda  $D_1$  je zavřena z důvodu předpokladu, že se kondenzátor  $C_1$  nevybil a dioda  $D_3$  je závěrně polarizována, takže rovněž zavřena. Proud vede pouze dioda  $D_3$ . Zdroj, který napájí třetí stupeň jednocestného usměrňovače, je sériové spojení vstupního napětí a napětí na kondenzátoru  $C_2$ , které se rovná dohromady napětí o velikosti  $3 \cdot U_0$ . Ačkoliv v cestě nabíjecího proudu třetího usměrňovače se vyskytuje kromě kondenzátoru  $C_3$  rovněž kondenzátor  $C_1$ , který je dobíjen na napětí  $U_0$  zbývá na kondenzátor pouze napětí o velikosti  $2 \cdot U_0$ . Napětíové zdroje tvoří vstupní napětí a kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$ , které jsou rovněž v sérii. Proud z těchto zdrojů se uzavírá přes diodu  $D_3$  a kondenzátor  $C_3$ .
4. půlvlna: Během této půlvlny je střídavé napětí orientováno tak, že na horní svorce je záporný potenciál a na spodní kladný potenciál. Dioda  $D_4$  a kondenzátor  $C_4$  tvoří čtvrtý stupeň Delonova násobiče a platí pro něj obdobná situace. Napětí získané z tohoto stupně lze spočítat pomocí II. Kirchhoffova zákona:

$$u_{vst} \cdot \sqrt{2} + U_0(C_1) + 2 \cdot U_0(C_3) - 2 \cdot U_0(C_2) = 2 \cdot U_0. \quad (5.9)$$

Zařazením dalších stupňů do násobiče napětí vede k obdobným výsledkům. Obecně platí, že všechny kondenzátory kromě  $C_1$  se nabíjí na napětí  $2 \cdot U_0$ . [11]

## 6 REALIZACE

### 6.1 DELONŮV NÁSOBIČ

Pro návrh napájecího stejnosměrného zdroje vysokého napětí bylo vycházeno z úvahy, že výstupní impedance bude takřka nekonečná. To způsobí, že procházející proud napájecího zdroje bude malé hodnoty a není nutno brát na něj zřetel. Vstupní přiváděné napětí do Delonova násobiče je síťového charakteru tj. 230 V o frekvenci 50 Hz. Pro požadované co možná největší výstupní napětí, byl Delonův násobič složen z deseti jednotlivých stupňů

jednocestných usměrňovačů. Výsledné výstupní již stejnosměrné napětí má přibližnou hodnotu 3,2 kV. Na úbytek napětí diod nebylo přihlíženo .

Diodami protéká proud střední hodnoty, který není nikterak velký a jak již bylo zmíněno, není v tomto zapojení podstatný. Křemíkové diody jsou proudově mnohokrát přetížitelné, pulzně až stonásobně. Diody jsou namáhány zejména napět'ově, kde dioda musí být zvolena na závěrné napětí. Zde je nutno brát v úvahu nejméně příznivý stav, že je zátěž od zdroje odpojena, nebo-li stav naprázdno. Pak se kondenzátory mohou nabíjet přibližně na maximální amplitudu vstupního (sít'ového) napětí. Ze zapojení je zřejmé, že závěrné napětí diody je vždy rovno součtu špičkových napětí na kondenzátoru a napětí vstupující do zdroje. [11]

$$U_{Rmax} = u_{vst} \cdot \sqrt{2} + U_0 = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot u_{vst}. \quad (6.1)$$

Diody musí poté vyhovovat tím, že jejich závěrné napětí bude větší než vypočtené  $U_{Rmax}$ . Diody typu BY 255 tuto podmínku splňují a jsou také použity.

Kromě usměrňovacích diod v jednocestných usměrňovacích stupních, tvořící násobič napětí, jsou již jen nabíjecí kondenzátory. Velikost kapacit jednotlivých nabíjecích kondenzátorů lze navrhnout z empirického vztahu:

$$C_N > \frac{2 \cdot n \cdot (n + 2) \cdot I}{(U_0 \cdot f)} [F], \quad (6.2)$$

kde:  $n$  je počet stupňů násobiče [-],

$I$  je střední hodnota proud do zátěže v [A],

$U_0$  je maximální hodnota napětí základního stupně ve [V],

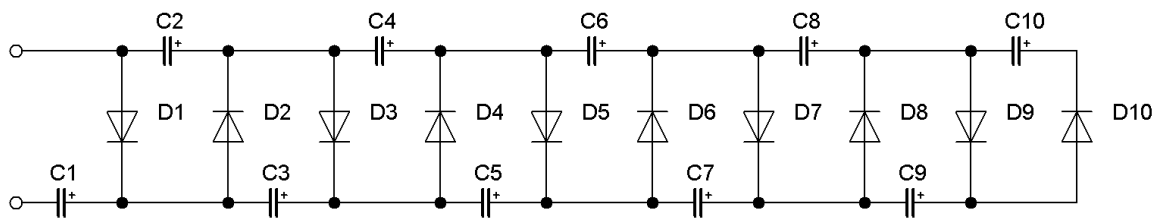
$f$  je kmitočet napětí v [Hz].

Kondenzátory se napět'ově dimenzují na napětí převyšující dvojnásobné hodnotě  $U_0$ .

$$U_C > 2 \cdot U_0. \quad (6.3)$$

Jestliže všechny použité kondenzátory vyhovují této podmínce, potom jsou vhodné pro návrh a samotnou konstrukci. Jen první kondenzátor by stačil dimenzovat na napětí poloviční oproti zbylým. Pro jednotnost se však dimenzuje jako všechny ostatní kondenzátory. Jelikož zde není podstatná ani zadaná míra celkového výstupního zvlnění, tak

velikost kapacit není nijak důležitá. Použité kondenzátory jsou typu WIMA MKS 4 0,22  $\mu\text{F}$ , 630 V. Schéma zapojení zkonstruovaného Delonova násobiče je zobrazeno obr. 6.1.



Obr. 6.1. Schéma vytvořeného deseti stupňového Delonova násobiče

Výstup je vyveden na svorky barevně označené. Červená zdířka značí kladný pól, modrá záporný pól a zelená zdířka je typu ochranného vodiče.

## 6.2 RÁZOVÝ GENERÁTOR

Nosná konstrukce rázového generátoru je zhotovena ze skla, která mimo jiné zajišťuje i potřebné izolační vlastnosti celého elektrického zařízení. Jednotlivé části skel jsou k sobě navzájem přilepeny lepidlem, které se vytvrzuje pomocí ultrafialového světla. Jednotlivá jiskřiště jsou v podobě nýtů s půlkulatou hlavou. Tímto tvarem se chtělo co nejvíce přiblížit tvarům kulových jiskřišť, která zrovna nejsou konvenčním materiálem. Materiál nýtů je měď, rozměry nýtů je 6 mm průměru a 30 mm délky. Jiskřiště jsou horizontálního typu s vertikálním uspořádáním, kde jednotlivé jiskřiště je tvořeno párem nýtů, jejichž hlavy míří k sobě. Dielektrikum mezi jiskřišti je vzduch. Celkem rázový generátor je vybaven šesti jiskřišti, která jsou umístěná nad sebou a jsou rovněž přichycena ve skle. Vzdálenost mezi jiskřišti je pevně nastavena. První jiskřiště tzv. startovací je dodatečně vybaveno ještě třetí elektrodou, které bude samostatně a podrobněji popsáno níže.

Nabíjecí kondenzátory typu Siemens 0,22  $\mu\text{F}$ , 3400 V jsou horizontálně posazeny na jednotlivých policích a jejich počet je totožný s počtem jiskřišť.

### 6.3 TRIGATRON

Startovací jiskřiště je nejnižší umístěné jiskřiště ze všech. Liší se od ostatních tím, že do jedné z hlavních elektrod je dodatečně vložena elektroda spouštěcí. Toho se docílilo tak, že byl nýt, nebo-li elektroda podélně vysoustružena s patřičným průměrem. Do vzniklého prostoru byla umístěná spouštěcí elektroda. Tuto elektrodu představoval slabý, pevný měděný vodič, který byl izolačně oddělen od vnější elektrody. Slabý jednak proto, aby vodič mohl být patřičně odizolován a vykazoval patřičnou elektrickou pevnost vůči hlavní elektrodě, ale také z důvodu uplatnění účinků koróny za předpokladu přivedení vysokonapěťového impulsu. Účinek koróny se projevuje zejména na ostrých hranách a nerovnoměrnostech vodiče vyzařováním ultrafialového záření, které doprovází vznik volných elektronů v prostoru mezi hlavními elektrodami. Vzniklé volné elektrony ionizují tento prostor a vytvářejí podmínky pro napěťový přeskok jiskřiště tvořeného z hlavních elektrod.

### 6.4 PŘIVEDENÍ STARTOVACÍHO VN IMPULZU

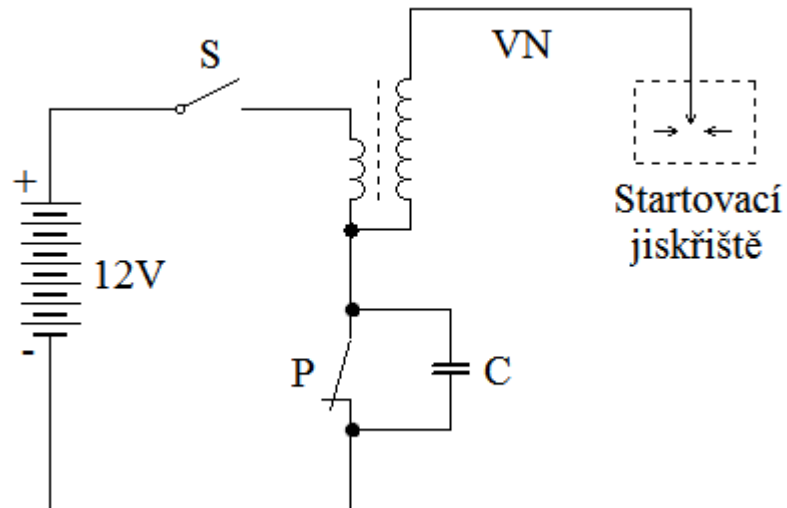
Vysokonapěťový impuls se přivádí ze samostatného elektrického obvodu. Elektrický obvod je složen z akumulátoru, spínače, rozpínacího kontaktu přerušovače a zapalovací cívky. Jedná se o klasické bateriové zapalování. Vysoké napětí vzniká postupnou transformací energie z akumulátoru na startovací elektrodu. Sepnutím spínače prochází primárním vinutím zapalovací cívky proud, který se uzavírá přes kontakty přerušovače ke kostře na záporný pól baterie. V okamžiku rozpojení kontaktů přerušovače vzniká výboj na spouštěcí elektrodě.

Vysoké napětí se na sekundární straně cívky vytváří elektromagnetickou indukci, tj. rychlou změnou magnetického toku. Magnetický tok předává energii do magnetického obvodu cívky. Při přerušení kontaktů přerušovače, začne rychle klesat hodnota procházejícího proudu v primárním obvodu. Hodnota elektrického proudu před jeho přerušením je cca 4 až 6 A, v úvaze použitím 12V olověného akumulátoru [7]. To má za následek rychlou změnu magnetického toku, kde na okamžik zaniká magnetické pole vyvolané průtokem proudu v primárním obvodu. Časová změna proudu a přeměna elektrické energie na magnetickou a

následně v sekundárním vinutí cívky nazpět, vyvolá vznik naindukovaného napětí a proudu. Hodnota indukovaného napětí je úměrná:

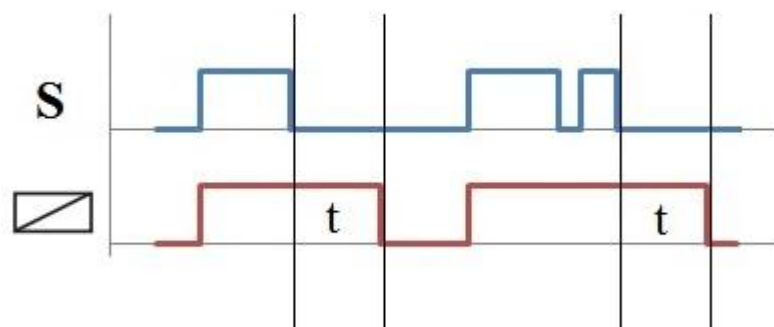
- velikosti změny proudu v primárním obvodu
- poměru primárních a sekundárních závitů
- indukčnosti primárního vinutí
- součiniteli vazby, tj. vzájemné blízkosti vinutí cívky
- nahromaděné energii v magnetickém poli indukční cívky

Pro činnost bateriového zapalování, má rychlost zvětšování proudu a velikost akumulované energie důležitý význam z hlediska dostatečného výboje. Proud procházející primárním vinutím cívky v závislosti na čase, narůstá v okamžiku sepnutí kontaktů přerušovače. Po jistém čase se přiblíží k maximální hodnotě, kterou je možno spočítat z Ohmova zákona, tj. poměru napětí akumulátoru a elektrického odporu vinutí. Čas potřebný k nárůstu proudu zhruba na 60 % maximální hodnoty je dáno časovou konstantou (6.5). Ke kontaktům přerušovače je paralelně připojen kondenzátor, který potlačuje nebo alespoň omezuje vzniku a dobu trvání elektrického oblouku. Elektrický oblouk je vodivý, a ačkoliv jsou kontakty přerušovače navzájem oddáleny, elektrický obvod se může stále jevit jako uzavřený. Cílem jak již bylo uvedeno je dosažení časové změny proudu, tedy zkrátit čas skutečného přerušování kontaktů a urychlit tak časovou změnu proudu a zlepšit indukci napětí. Běžně užívaná hodnota kapacity činí 0,3  $\mu\text{F}$ . V tomto případě je použit kondenzátor značky Tesla řady WK 717 28/0,25  $\mu\text{F}/250 \text{ V}$ . Značné proudy na ploše kontaktů způsobují jejich opalování. Po rozpojení kontaktů přerušovače je přerušen obvod proudu. Kontakty jsou přemostěny kondenzátorem zapojeným paralelně ke kontaktům. Kondenzátor je sice pro stejnosměrný proud nevodivý, avšak nashromážděnou energii v magnetickém obvodu indukční cívky dokáže přijmout. To jej nabije na poměrně vysoké napětí přibližující se hodnotě pracovního napětí kondenzátoru. Přelévání energie z indukční cívky do kondenzátoru lze provádět (při startování spalovacích motorů se provádí) vícenásobně. Důsledkem toho je, že obvodem indukční cívky prochází střídavý proud neharmonického průběhu, který v sekundárním vinutí indukuje vysoké napětí úměrné převodu indukční cívky. Teoreticky výsledná hodnota napětí může dosahovat až 18 kV. [5]



Obr. 6.2 Elektrický obvod pro vytvoření a přivedení VN impulsu do startovacího jiskřiště

Funkci přerušovače koná časové multifunkční relé CRM-91H, které pracuje jako zpožděný návrat po vypnutí ovládacího kontaktu s okamžitým sepnutím výstupu. Jeho napájení je 230V/50Hz. Sepnutím spínače je rozpínací kontakt přerušen po časovou prodlevu, kterou lze nastavit. V konkrétním případě lze časovou prodlevu nastavit na nejmenší hodnotu, což je 0,1 s. Protože časová konstanta elektrického obvodu znázorněného na obr. 6.2 je jen několik jednotek milisekund, tak plně postačuje.



Obr. 6. 3 Zpožděný návrat po vypnutí ovládacího kontaktu s okamžitým sepnutím výstupu jako funkce multifunkčního časového relé CRM-91 H



### 6.4.1 ZAPALOVACÍ CÍVKA [6], [7], [8]

Zapalovací cívka slouží pro startovací cyklus vznětových a zážehových motorů vozidel a motocyklů. Pracuje obdobně jako transformátor s rozdílem, že vykazuje větší magnetický odpor. Magnetický odpor je přerušen vzduchovou mezerou. Pro energii magnetického pole platí:

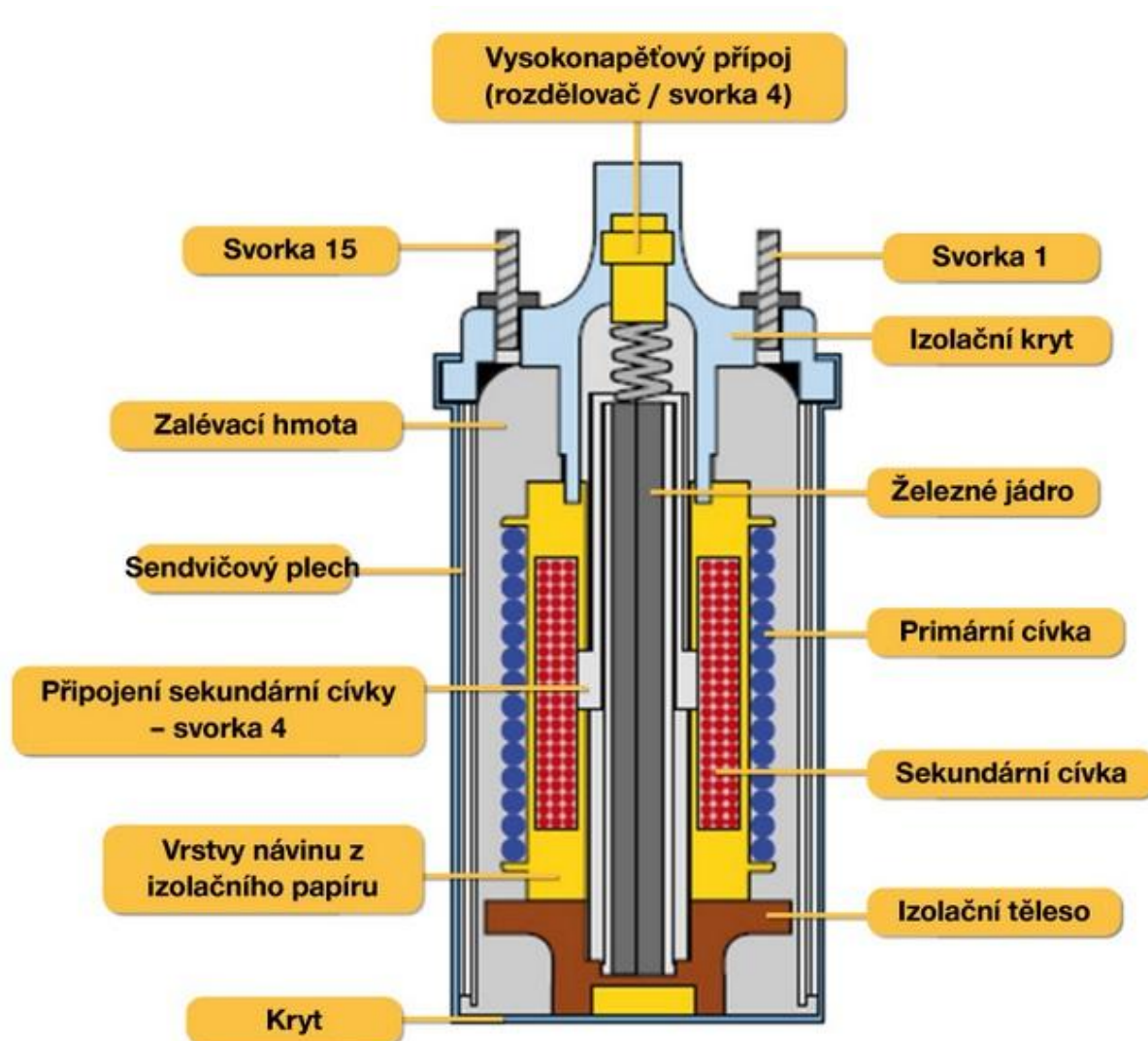
$$W_L = \frac{1}{2} \cdot L_1 \cdot I_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \Phi \cdot N_1 \cdot I_1 = \frac{1}{2} \Phi^2 R_m, \quad (6.4)$$

kde  $\Phi$  je magnetický tok,  $N_1$  počet závitů primárního vinutí zapalovací cívky,  $R_m$  magnetický odpor zapalovací cívky,  $L_1$  indukčnost primárního obvodu,  $I_1$  proud procházející primárním obvodem.

Zapalovací cívka je schopna akumulovat energii do vlastního magnetického pole a předat ji do obvodu s vysokým napětím. Cívka je složena z primárního a sekundárního vinutí. Poměr závitů primárního vinutí vůči vinutí sekundárnímu je běžně 1:90 [7]. Primární i sekundární vinutí jsou navinutá z měděného drátu a uložena na společném železném jádře. Primární vinutí je konstrukčně uspořádané tak, že představuje vnější vrstvu složenou ze samotných závitů. Průřez těchto závitů je větší oproti sekundárním. Vzdálením od železného jádra bylo docíleno toho, že se primární vinutí dobře chladí a také, že má vinutí větší elektrický odpor. Větší elektrický odpor zkracuje časovou konstantu. Výpočet časové konstanty lze pomoci:

$$\tau = \frac{L}{R}, \quad (6.5)$$

kde  $L$  představuje indukčnost a  $R$  elektrický odpor primárního vinutí. K zamezení elektrického průrazu slouží samotná izolace vodičů a zalévací hmota uvnitř cívky. Zalévací hmotou může být olej či epoxidová pryskyřice. Epoxidová pryskyřice není za normálních teplot tekutá, proto její plnění se uskutečňuje za vysokých teplot, kde je třeba dbát na to, aby se nevytvořili žádné bubliny, které by mohly být tepelně i elektricky namáhány. Železné jádro zesiluje magnetické pole a je tvořeno s navzájem izolovaných elektrotechnických plechů. Cívka má tři svorky, dvě z nich označované čísly 1 a 15 jsou určeny jako napájení z akumulátorů, přičemž svorka 15 značí kladný pól a 1 pól záporný. Třetí svorka slouží jako vývod vysokého napětí.



Obr. 6.4 Průřez klasickou zapalovací svíčkou (převzato z [8])

## 7 ZÁVĚR

Diplomová práce ve svém úvodu objasňuje terminologii a problematiku spojenou s atmosférickými, spínacími přechodnými jevy a simulacemi jejich zkoušek platných podle norem ČSN EN 60060-1 a ČSN EN 61000-4-5 ed. 2.

Dále do teoretické části je zahrnuta část, popisující princip rázového generátoru, způsob jeho využití a další jednotlivé druhy dnes používaných rázových generátorů. Použití je dnes skoro výhradně určeno pro diagnostiku elektrických zařízení.

Pro návrh výstupního obvodu modelující normalizovaný spínací impuls napětí označován jako 250/2500  $\mu\text{s}$ , byl navrhnut pomocí Angeliniho výpočtů a tabulek. Vypočtené hodnoty odporů modelující spínací napěťový impuls byly 2107  $\Omega$  326  $\Omega$ , přičemž první hodnota simuluje tvar a dobu vzestupu čela a druhá hodnota charakterizuje tvar a dobu půltýlu. Jako zatěžovací kapacita byla uvažována 500 nF. Kapacita byla zvolena jako optimální poměr ekvivalentní výsledné kapacity rázového generátoru.

Poslední část se zabývá návrhem a konstrukcí napájecího obvodu, rázového generátoru a systémem pro jeho spouštění. Zhotovený Delonův násobič poskytuje výstupní stejnosměrné napětí 3 kV. Po sestavení konstrukce rázového generátoru a propojení kabeláží s jiskřišti byla nutnost nastavit patřičné rozměry jiskřišť. Nastavení vzdáleností jiskřišť se částečně odvíjelo ze znalosti elektrické pevnosti vzduchu, která je 1 až 3 kV na milimetr. Velmi ale také záleží na tvaru elektrod. Úpravou a výměnou dosavadního generátoru, který byl vybaven hrotovými jiskřišti za jiskřiště zhotovené z nýtů s pūkulatou hlavou bylo zjištěno, že přesková vzdálenost byla v prvním případě větší než nyní. Důvodem byl výraznější účinek koróny, zejména na ostrých hrotech jiskřišť. Během zkoušení a uvádění rázového generátoru do provozu, bylo zapotřebí nejprve nastavit největší možné vzájemné vzdálenosti jiskřišť, při kterých ještě dochází k elektrickému přeskoku vzduchu, a to z toho důvodu, aby se kondenzátory nabily na co možná největší napětí. Přičemž prvnímu jiskřišti bylo potřeba věnovat největší pozornost. Hodnota odpovídající těmto požadavkům byla 0,9 mm. Na posledním jiskřišti lze v době, kdy je rázový generátor uveden do činnosti očekávat napětí hodnoty až 18kV.

Pro návrh a konstrukci spouštěcího mechanismu tzv. trigatronu se zabývá další část této práce. Zde bylo zapotřebí modifikovat první zmiňované jiskřiště a zvětšit jeho vzájemnou vzdálenost o 0,15 mm. Výsledná vzdálenost mezi dvěma elektrodami tvořící jiskřiště je nyní zhruba 1 mm. Modifikaci tvořilo zhotovení prostoru jedné elektrody vhodné pro vložení a zavedení třetí tzv. startovací elektrody. Vhodné místo se zhotovilo provrtáním skrze podélnou osu elektrody. Startovací elektrodu tvořil upravený vysokonapěťový kabel propojující zapalovací cívku se zapalovací svíčkou v automobilech. Pro přivedení vysokonapěťového impulsu na spouštěcí elektrodu, která zapálí první a následně všechna zbylá jiskřiště, napomohl elektrický obvod bateriového zapalování automobilů. Zde ve výsledku nebylo možné použít 12 V olověný akumulátor, protože nebylo takřka možné zabránit nežádoucím elektrickým průrazům izolace v místech umístění startovací elektrody. Délka přeskoků jiskry

nebo-li elektrického výboje zde dosahovala vzdálenosti zhruba dva centimetry. Nakonec byl olověný akumulátor nahrazen plochou 4,5 V baterií, čímž bylo docíleno zmenšení hodnoty velikosti napětí, avšak plně postačující pro zapálení prvního jiskřiště.

Před samostatným uvedením rázového generátoru do činnosti, tj. hlavně před připojením napájecího zdroje do napájecí sítě je nutné zjistit její typ. Druh napájecí sítě je důležitý pro správnou funkci připojeného elektrického zařízení. Podle toho, zda se jedná o napájecí síť charakteru TN-C či TN-C-S, tak se na výstupu Delonova násobiče musí, či nemusí propojit svorka ochranného vodiče se zápornou svorkou výstupního stejnosměrného napětí.

Toto zařízení je velice nebezpečné, kondenzátory zůstávají dlouho nabitě i po vypnutí rázového generátoru. Obsluhu mohou proto provádět jen osoby znalé zásad práce s vysokým napětím. Rázový generátor vytváří silné elektromagnetické pole, které může narušit či poškodit správnou činnost elektronických přístrojů a obvodů umístěných poblíž zařízení.

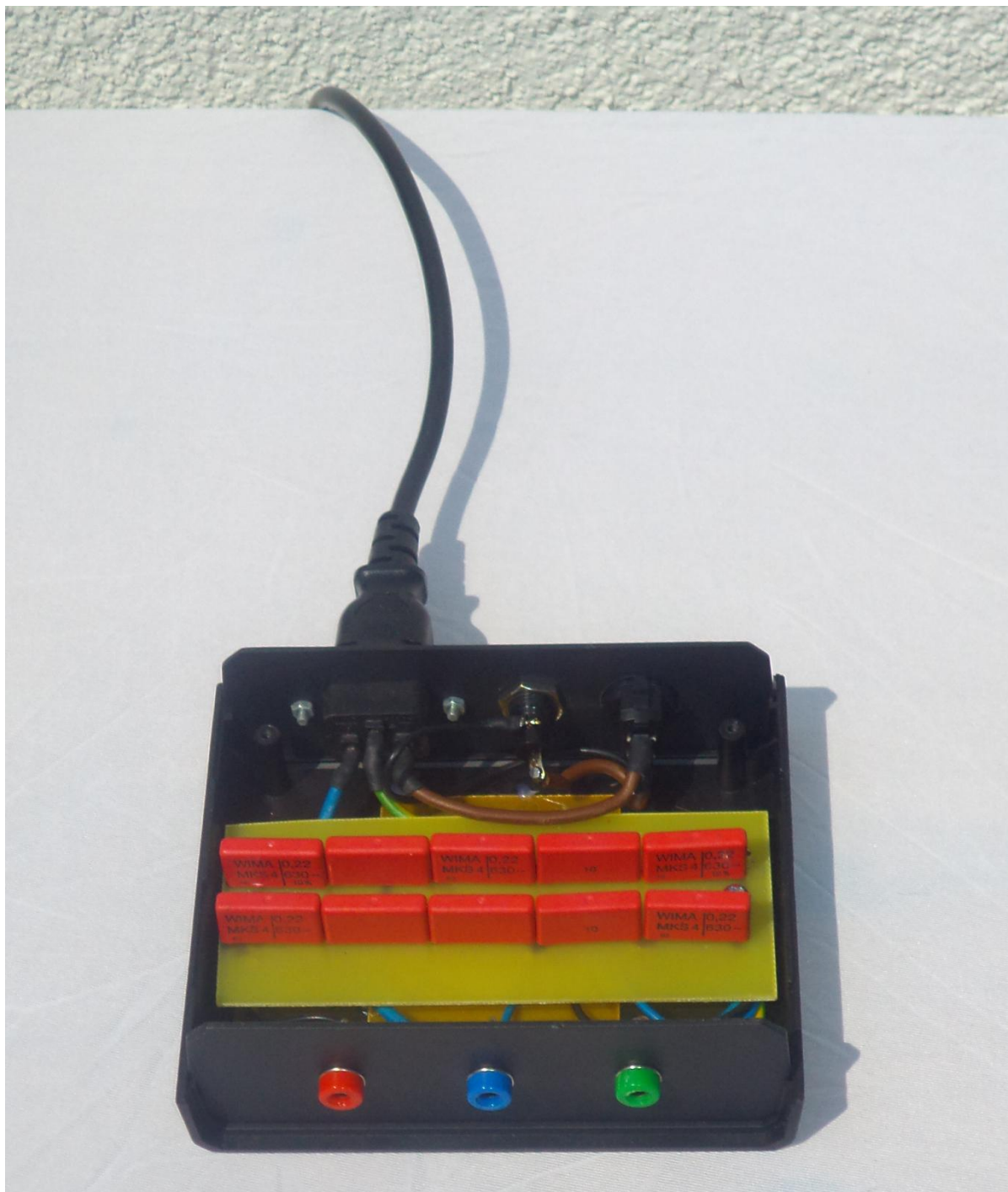
## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 2. přepr. vyd. Praha 1: SNTL, 1978, 301 s. ISBN 04-512-78.
- [2] KUFFEL, E, W ZAENGL a J KUFFEL. *High voltage engineering: fundamentals*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000, xiii, 239 p. ISBN 07-506-3634-3.
- [3] ČSN EN 60060-1. *Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. 2011.
- [4] Přenos elektrické energie budoucnosti. [online]. [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: [http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/05/prenos\\_3.html](http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/05/prenos_3.html)
- [5] *Zapalování: Bateriové zapalování*. [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: [http://lazo.czechian.net/elektrika/zapalovani.htm#Obr. 31](http://lazo.czechian.net/elektrika/zapalovani.htm#Obr.31)
- [6] *Zapalování: Zapalovací cívka*. [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: [http://lazo.czechian.net/elektrika/zapalovani.htm#Obr. 31](http://lazo.czechian.net/elektrika/zapalovani.htm#Obr.31)
- [7] *Mechatronika: Zapalování* [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://mechatronika.wz.cz/index.php?z=zap>
- [8] NGK: *Uspořádání klasické zapalovací cívky NGK* [online]. [cit. 2014-04-09]. Dostupné z: <http://www.ngk.de/cz/technicke-detaily/zapalovaci-civky/usporadani-zapalovaci-civky/usporadani-klasickyh-zapalovacich-civek/>
- [9] Analysis of breakdown mechanism in trigatron switches. In: LI CAI, LEE LI, YUNLONG LIU, BIN YU, CHAOBIN BAO a FUCHANG LIN. *Analysis of breakdown mechanism in trigatron switches* [online]. 2013 [cit. 2014-04-09]. DOI: 10.1109/TDEI.2013.6571419. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6571419&queryText%3DAnalysis+of+breakdown+mechanism+in+trigatron+switches>

- [10] Marx generator. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-02-11]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Marx\\_generator](http://en.wikipedia.org/wiki/Marx_generator)
- [11] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Lineární napájecí zdroje*. 1. vyd. BEN - technická literatura, 2001, 136 s. ISBN 80-730-0002-4.
- [12] ČSN EN 61000-4-5 ed. 2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC): Zkušební a měřicí technika - Rázový impulz - Zkouška odolnosti*. Český normalizační institut, 2007.
- [13] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [14] Zařízení laboratoří VN. *Laboratoře vysokého napětí a elektromagnetické kompatibility* [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~laurenc/images/razak.jpg>
- [15] České vysoké technické učení v Praze: Laboratoř vysokých napětí. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://poli.feld.cvut.cz/k315lab/foto5.jpg>
- [16] *Impulse voltage generators: 100 kV up to 1200 kV - Series L*. Dresden. Dostupné z: <http://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/3-11-5.pdf>
- [17] *Power High Voltage Test* [online]. 2008 [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.powerhv.com/products/detail/Impulse-Voltage-test-system/11/0/53>
- [18] Study of characteristics and performance optimization of a three-electrode spark gap. In: LI CAI, LEE LI, CHAOBIN BAO, LIU YUNLONG, YU BIN, GE YAFENG, XIE LONGJUN a FUCHANG LIN. *Study of characteristics and performance optimization of a three-electrode spark gap* [online]. [cit. 2014-05-04]. DOI: 10.1109/TDEI.2013.6571414. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=study+of+characteristics+and+performance>

## 9 PŘÍLOHY

### *Příloha A- Ukázka jednotlivých komponentů rázového generátoru*



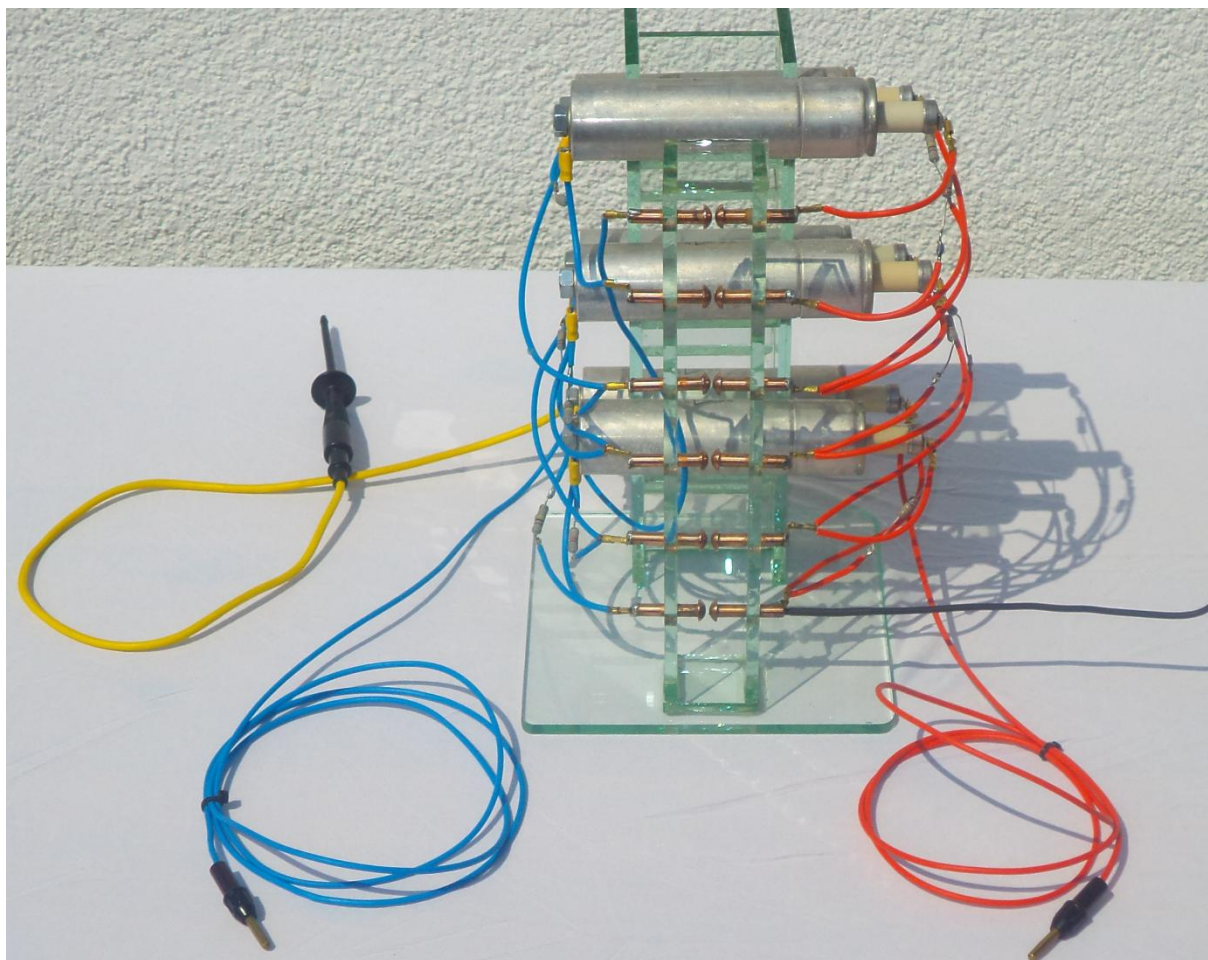
Obr. A1 Delonův kaskádní jednocestný násobič



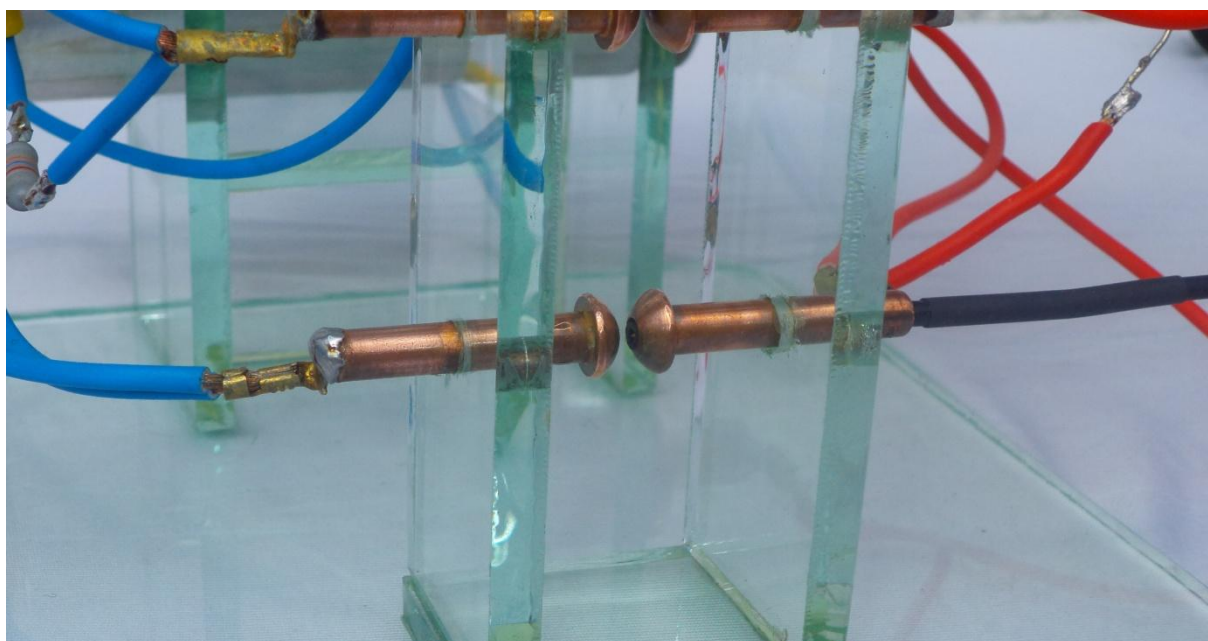


Obr. A2 Bateriové zapalování sloužící jako obvod pro přivedení startovacího pulzu

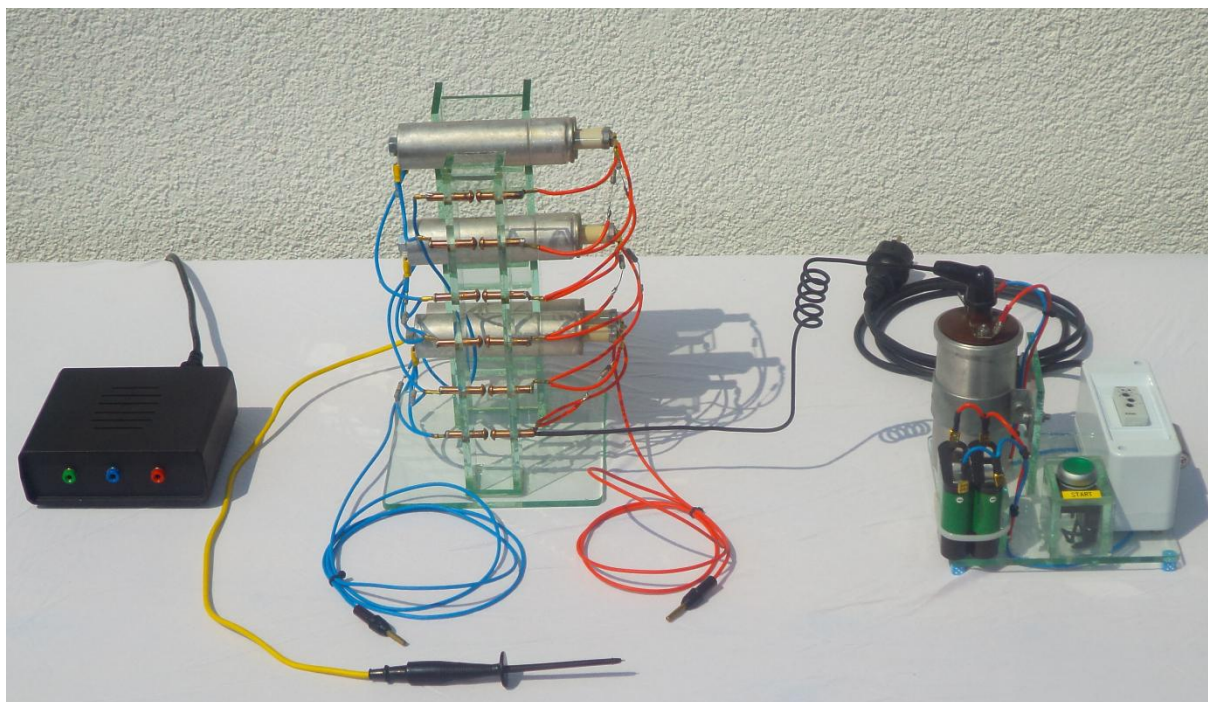




Obr. A3 Rázový generátor



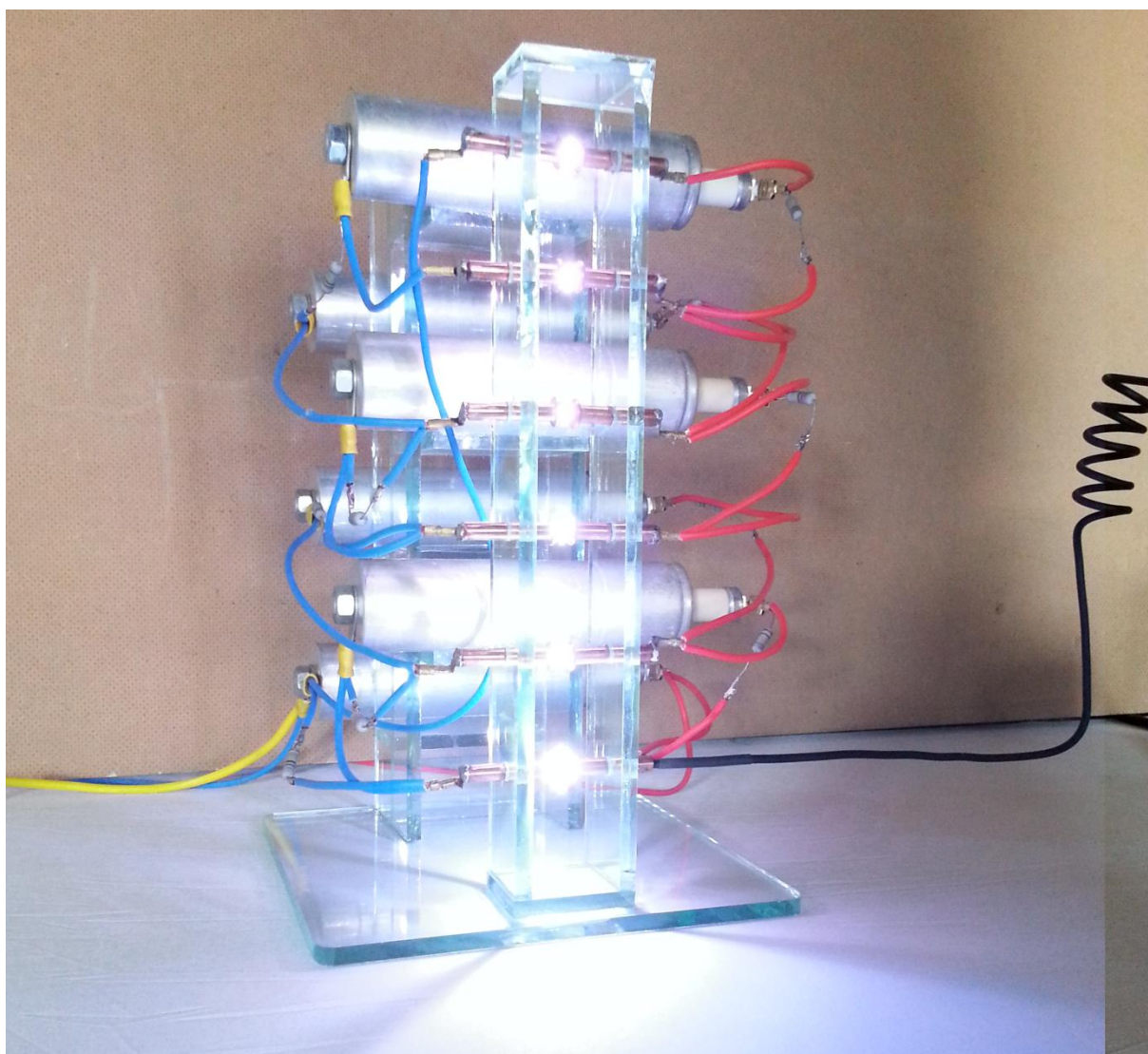
Obr. A4 Trigatron



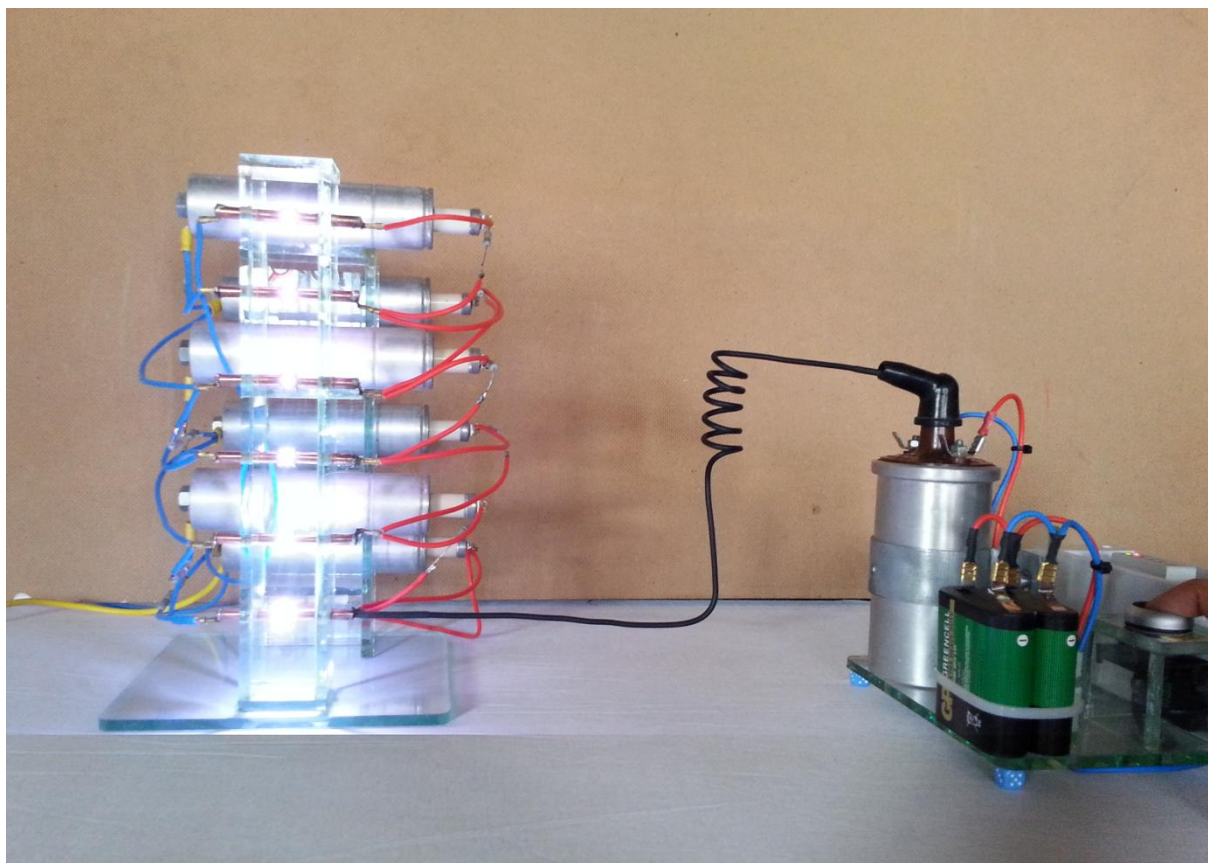
Obr. A5 Kompletní sestava rázového generátoru



***Příloha B- Rázový generátor v činnosti***



Obr. B1 Elektrický přeskok na rázovém generátoru – jiný pohled



Obr. B2 Elektrický přeskok na rázovém generátoru

**Příloha C- Ukázka rázových generátorů a jejich parametry**

Obr. C1 Rázový generátor Haefely 600 kV, 4 kJ – ZČU v Plzni (převzato z [14])

**Electrical main parameters**

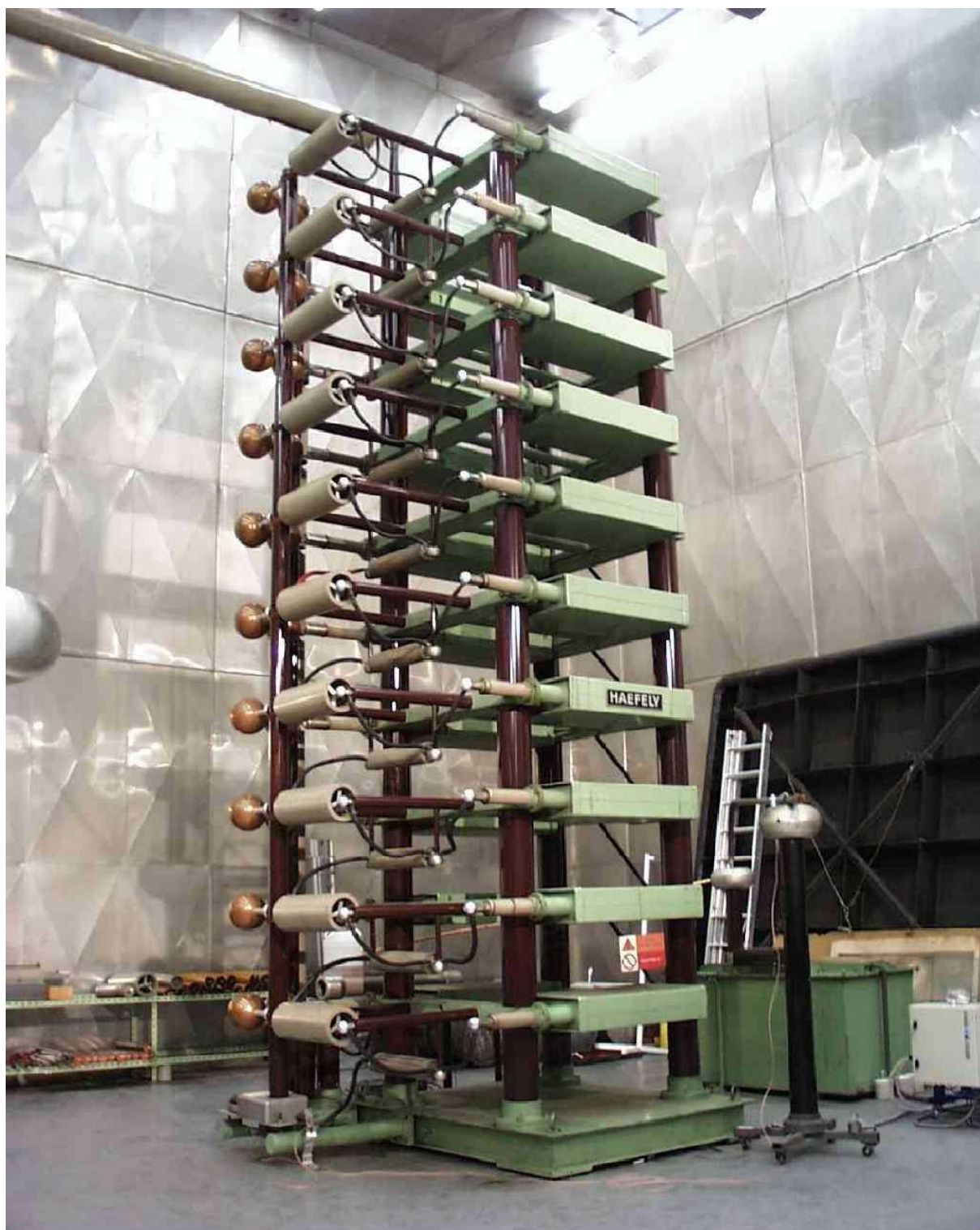
Stage energy <sup>1)</sup>		2.5 kJ		5 kJ	
Total charging voltage	Number of stages	Total charging energy	Impulse capacitance	Total charging energy	Impulse capacitance
kV		kJ	nF	kJ	nF
100	1	2.5	500	5	1000
200	2	5.0	250	10	500
300	3	7.5	167	15	333
400	4	10.0	125	20	250
500	5	12.5	100	25	200
600	6	15.0	83	30	167
700	7	17.5	71	35	143
800	8	20.0	63	40	125
900	9	22.5	56	45	111
1000	10	25.0	50	50	100
1100*	11	27.5	45	55	91
1200*	12	30.0	42	60	83
Min. time difference between impulses		20 s		40 s	
Capacitors per generator stage		1 x 0.50 µF/100 kV		1 x 1 µF/100 kV	

\*) Only stationary

<sup>1)</sup> Other stage energies resp. other min. time difference between impulses on request

Obr. C2 Rázový generátor firmy HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH (převzato z [16])





Obr. C3 Rázový generátor Haefely 2 MV, 50 kJ - ČVUT v Praze (převzato z [15])