

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měřicí sestava pro zkoušky impulzním napětím

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří BUREŠ**
Osobní číslo: **E13N0067P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Měřicí sestava pro zkoušky impulzním napětím**
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 :

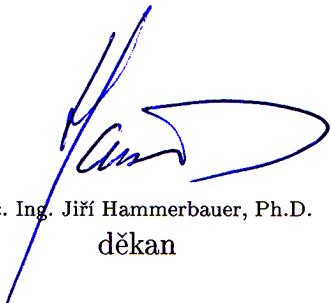
1. Vypracujte odborný text zabývající se problematikou vysokonapěťových zdrojů napětí se zaměřením na zdroje impulzního napětí.
2. Popište způsoby přímého a nepřímého měření impulzního napětí a metodu kalibrace impulzního generátoru.
3. Ověřte činnost impulzního generátoru a nepřímého měřicího systému amplitudy impulzního napětí.
4. Proveďte kalibraci vrcholového voltmetru pro různé nastavitelné rozsahy měřiče.
5. Výsledky kalibrace vhodně zpracujte tak, aby se daly aktivně používat při práci s generátorem (nastavovat amplitudu výstupního napětí generátoru v požadovaných napěťových krocích).

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


1. ČSN EN 60060-1, Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky
2. Veverka, A.: Technika vysokých napětí. SNTL 1982.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Martínek, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




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

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá výrobou zkušebního napětí. Práce obsahuje přehled vysokonapěťových zkušebních zdrojů. Hlavním tématem je impulzní generátor pro výrobu atmosférického impulzního napětí. Stěžejním bodem práce je kalibrace měřícího systému, která je nezbytná pro využití impulzního generátoru pro dielektrické zkoušky.

Klíčová slova

vysoké napětí, atmosférické impulzní napětí, zkušební zdroj, impulzní generátor, měřicí systém, kalibrace

Abstract

Measuring setup for impulse voltage tests

This master's thesis deals with generation of test voltage. It contains summary of high voltage test sources. The main topic is an impulse generator for generation of lightning-impulse voltage. The most important part of this thesis is calibration of the measuring system, which is necessary for utilization of the impulse generator for dielectric tests.

Key words

high voltage, lightning-impulse voltage, test voltage source, impulse generator, measuring system, calibration

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....

podpis

V Plzni dne 11.5.2015

Bc. Jiří Bureš

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Petru Martínkovi, Ph.D., za jeho cenné rady poskytované během tvorby DP, ochotu a čas strávený zejména dohledem při praktických měřeních. Rovněž děkuji pracovníkům katedry, kteří mají podíl na zajištění provozu a údržby vybavení laboratoře vysokých napětí.

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 Zkušební zdroje vysokého napětí	12
1.1 Úvod do problematiky vysokého napětí	12
1.2 Zdroje střídavého napětí	13
1.2.1 Jednostupňový transformátor	14
1.2.2 Kaskádní transformátor	14
1.2.3 Teslův transformátor	15
1.3 Zdroje stejnosměrného napětí	17
1.3.1 Usměrňovače	17
1.3.2 Van de Graaffův generátor	17
1.3.3 Stejnosměrná kaskáda	18
1.4 Zdroje impulzního napětí	19
1.4.1 Impulzní napětí	19
1.4.2 Normalizovaný atmosférický impulz napětí	20
1.4.3 Princip impulzního generátoru	20
1.4.4 Simulace jednostupňového impulzního generátoru	21
1.4.5 Algoritmus řešení a vykreslení výsledného impulzního napětí	22
1.4.6 Alternativní zapojení impulzního generátoru	23
2 Měření impulzního napětí	25
2.1 Termíny a definice	25
2.2 Měřicí metody	26
2.2.1 Přímé metody	26
2.2.2 Nepřímé metody	26
2.3 Kulové jiskřiště	26
3 Experimentální ověření vlastností impulzního generátoru	28
3.1 Popis měřicí sestavy	28
3.2 Postup kalibrace	29
3.3 Ověření měřicí cesty a vlastností generátoru za účelem vylepšení tvaru impulzu	31
3.3.1 Vliv způsobu připojení měřicího zařízení	31
3.3.2 Vliv vlastního impulzního generátoru	32
3.3.3 Vliv zemnicího systému	33
ZÁVĚR	35
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	36

SEZNAM PŘÍLOH.....	1
PŘÍLOHY	2
Příloha A – Simulace impulzního generátoru v prostředí DYNAST.....	2
Příloha B – Tabulka kulových jiskříšť	3
Příloha C – Dokumentace pracoviště v laboratoři VN.....	4
Příloha D – Tabulka naměřených hodnot.....	5
Příloha E – Kalibrační křivka pro vrcholový voltmetr.....	6
Příloha F – Kalibrační křivka pro nabíjecí napětí	7

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

nn	nízké napětí
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí
T_1	doba čela [μs]
T_2	doba půltýlu [μs]
C_1	činná kapacita [nF]
C_2	zatěžovací kapacita [nF]
R_1	čelní odpor [Ω]
R_2	týlní odpor [Ω]
D	průměr koule kulového jiskřiště [cm]
S	doskok kulového jiskřiště [mm]
t	teplota [$^{\circ}C$]
b	tlak [kPa]
δ	korekčním činitelem na hustotu vzduchu [-]
U_{tab}	tabelované přeskokové napětí [kV]
U_{kor}	korigované přeskokové napětí [kV]
U_{nab}	nabíjecí napětí [V]
U_{vv}	údaj vrcholového voltmetru [V]

ÚVOD

Tématem mé diplomové práce je problematika výroby normalizovaného atmosférického impulzu napětí, jež je základním předpokladem pro realizování zkoušek izolačních vlastností elektrických zařízení. Dielektrické zkoušky mají význam jak pro vývoj nových zařízení, testování zařízení uváděných do provozu, tak pro zařízení, která podléhají pravidelným revizím. Cílem práce je připravit zdroj - impulzní generátor Haefely umístěný v laboratoři VN a s ním spojený měřicí systém pro účely aktivního využití v rámci dalšího vědeckého výzkumu. Pro využití impulzního generátoru je důležitá především dostatečná citlivost nastavování amplitudy napětí. Protože pracujeme s napěťovými rázy, které jsou vyráběny v určitých časových odstupech, amplitudu nelze měřit plynule jako při práci se stejnosměrnými nebo střídavými napětími. Je tedy potřeba mít k dispozici nějaké prostředky, které nám toto regulování zefektivní. Právě zjednodušení, urychlení a vylepšení přesnosti nastavování výsledného napětí s požadovaným krokem je úkolem této práce. Součástí experimentu je rovněž volba vhodného zapojení impulzního generátoru s ohledem na dostatečnou citlivost a potřebné rozsahy napětí, okalibrování nepřímého měřicího systému pro různé rozsahy a v neposlední řadě snaha o vylepšení tvaru impulzu, sledování, co má vliv na hladkost výsledného tvaru.

V první kapitole je vytvořen přehled vysokonapěťových zkušebních zdrojů, důležitých pro napodobení provozních podmínek, ve kterých se zkoušené zařízení může nacházet. Zkušební zdroje jsou rozděleny podle druhu požadovaného napětí na střídavé, stejnosměrné a impulzní. Důraz je kladen na princip impulzního generátoru a parametry impulzního napětí. Druhá kapitola je věnována metodám měření impulzního napětí. Ty se dělí na přímé a nepřímé. Ve třetí kapitole je popsáno reálné uspořádání měřicí sestavy v čele s vlastním impulzním generátorem, postup a výsledky kalibrace. V poslední části experimentu byly zkoumány vlivy, které mohou ovlivnit hladkost výsledného tvaru impulzu.

1 Zkušební zdroje vysokého napětí

1.1 Úvod do problematiky vysokého napětí

Zařízení používaná při výrobě, přenosu, rozvodu a spotřebě elektrické energie jsou vystavována různým napěťovým poměrům. Dlouhodobě na ně působí jejich provozní napětí, ale kromě toho se na nich krátkodobě může vyskytovat množství přepěťových stavů, vznikajících při odlehčení sítě, zemních spojeních nebo zkratech, spínání, nebo vlivem atmosférických jevů. Je nezbytné zajistit, aby zařízení, resp. jejich izolační systémy, odolaly elektrickému namáhání všemi těmito napětími. [1]

V rámci zajištění správné funkčnosti vysokonapěťových zařízení se elektrotechnika neobejde bez nutnosti řešení problémů vznikajících při elektrickém namáhání izolačních systémů. Mezi takové problémy patří jak dimenzování systémů z hlediska namáhání, tak jejich optimalizace z hlediska ekonomického. [2]

Na analogickém principu, jako se při návrhu elektrických vedení vkládají do obvodu přesně dimenzované jistící prvky, které chrání další prvky v rozvodu před nadproudy, se při konstrukční a projekční činnosti vysokonapěťových zařízení provádí koordinace izolace z hlediska napětí, v závislosti na tom, zda na daném prvku izolačního systému hrozí poškození a jak velké škody mohou vzniknout. To se realizuje vhodným návrhem prvků izolačního systému a aplikací přepěťových prvků (odstupňováním).

Velmi důležitou činností u vysokonapěťových zařízení je diagnostika, čili kontrola skutečného stavu dielektrických vlastností izolačního systému. Ta sestává jednak z dílčích zkoušek a jednak z průběžného sledování parametrů dielektrických prvků. Napěťovým zkouškám se podrobují jak nová zařízení, tak zařízení uváděná do provozu. Na zařízeních, která jsou již v provozu, se zkoušky provádějí po určitých časových intervalech.

Úkolem zkušebnictví je napodobit veškeré provozní podmínky, ve kterých se zkoušené zařízení může nacházet. Zařízení ale nejsou namáhána pouze pracovními napětími, z různých důvodů vznikají situace, kdy jsou zařízení přídatně namáhána přepětími, která mají původ buď v přírodním jevu (blesk), nebo mají základ uvnitř systému, např. spínání sítě. Takto vzniklá přepětí se musí respektovat při návrhu a zkoušení zařízení. Aby bylo možné tyto v praxi se vyskytující jevy simulovat, musí existovat zdroje, které poskytují taková napětí, která při těchto situacích vznikají.

Je tedy logické, že zdroje musí být schopny poskytovat napětí mnohonásobně vyšší, než jsou jmenovitá provozní napětí. V tabulce 1 jsou uvedena doporučená napětí zkušebních zdrojů pro některá provozní napětí zkoušených zařízení.

Tab. 1 Doporučená napětí zkušebních zdrojů [1]

Max. provozní napětí [kV]	72,5	123	145	170	245	300	363	420	525	765
Zdroj stř. napětí	200	300	350	400	550	600	700	900	1000	1200
Zdroj imp. napětí	450	800	1000	1200	1600	1800	2000	2400	2800	3200
Zdroj ss. napětí	200	300	350	450	600					

V České republice je nejvyšší použitá napěťová hladina přenosové soustavy 400 kV, v zahraničí se lze setkat s hladinami až 1200 kV. Zkušební zdroje pro tuto nejvyšší napěťovou hladinu tedy musí poskytovat mnohonásobně vyšší napětí než 1200 kV. Z velikosti zkušebního napětí vyplývají také požadavky na izolační systém pomocných obvodů.

Zkušební zdroje vysokého napětí lze rozdělit podle druhu generovaného napětí do tří skupin:

- zdroje střídavého napětí
- zdroje stejnosměrného napětí
- zdroje impulzního napětí

Podmínky zkoušek a požadavky na zkušební zdroje a metody měření jsou definovány v příslušných technických normách. Přehled hlavních technických norem:

- ČSN EN 60060-1:2011 Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky
- ČSN EN 60060-2 ed. 2:2011 Technika zkoušek vysokým napětím – Část 2: Měřicí systémy
- ČSN EN 60052:2003 Měření napětí pomocí normalizovaných vzduchových jiskřišť

1.2 Zdroje střídavého napětí

Zdroje střídavého napětí se užívají pro zkoušky vysokým napětím síťového kmitočtu 50 Hz. Norma připouští toleranci kmitočtu v rozsahu 45 až 65 Hz. [3]

1.2.1 Jednostupňový transformátor

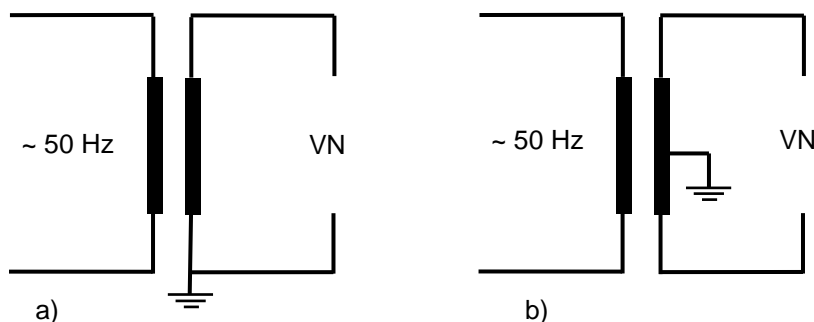
Zkušební transformátory se využívají pro zkoušky napětím o síťovém kmitočtu 50 Hz (převážně pro krátkodobé, do 1 min). Jsou obvykle jednofázové, lze jimi dosáhnout výstupního napětí až 750 kV. Od běžných napájecích transformátorů se liší zejména menším převodovým poměrem, větším regulačním rozsahem, menším koeficientem bezpečnosti izolace, který souvisí s malým výkonovým zatížením, protože při zkouškách není potřeba velkého výkonu. [1]

Výkon zkušební transformátoru je dán vztahem:

$$S = \omega \cdot C \cdot U_{zk}^2, \quad (1)$$

kde C je kapacita zátěže a U_{zk} je zkušební napětí.

Aby při strmých vlnách vlivem přeskoků nebo průrazů na zkoušeném zařízení nedošlo k přetížení izolace transformátoru, zapojuje se někdy mezi transformátor a zkoušené zařízení ochranný rezistor. Protože se pracuje s převážně kapacitními zátěžemi, je třeba pamatovat také na kompenzaci účinníku zkušebního obvodu. Regulace napětí by měla být plynulá, přesná a spolehlivá, aby byla zajištěna správnost výsledků zkoušek. [1]



Obr. 1 Zapojení zkušební transformátoru a) nesymetrické, b) symetrické

Vyrábí se ve dvou provedeních. V nesymetrickém provedení bez vyvedeného středu a symetrickém, kdy je střed vn vinutí vyveden na kovovou nádobu, která je od země izolována podpěrnými izolátory. Výhoda tohoto provedení je v tom, že nepotřebuje drahou průchodku k vyvedení vn z nádoby, nádoba je na polovičním potenciálu. [1]

1.2.2 Kaskádní transformátor

Pro napětí nad 750 kV by byla technická a cenová náročnost provedení izolace jednostupňového transformátoru neúměrně velká. Proto se používá transformátorová kaskáda, sériově se spojí sekundární vinutí několika zkušebních transformátorů. Primární vinutí

prvního stupně je napájeno z regulovaného zdroje a část sekundárního vinutí slouží jako budicí vinutí pro napájení primáru dalšího stupně. Převod mezi budicím a primárním vinutím je vždy 1:1. První transformátor je na zemním potenciálu, každý další je výše potenciálově položený než předchozí. Z toho vychází také požadavky na izolaci. [1]

Z hlediska výkonu první stupeň musí být dimenzován na celý výkon n -stupňové kaskády, druhý stupeň musí být dimenzován na $(n-1)/n$ celkového výkonu, třetí stupeň na $(n-2)/n$ výkonu atd. Jestliže výkon posledního stupně kaskády je:

$$S_n = \frac{U_2}{I_2}, \quad (2)$$

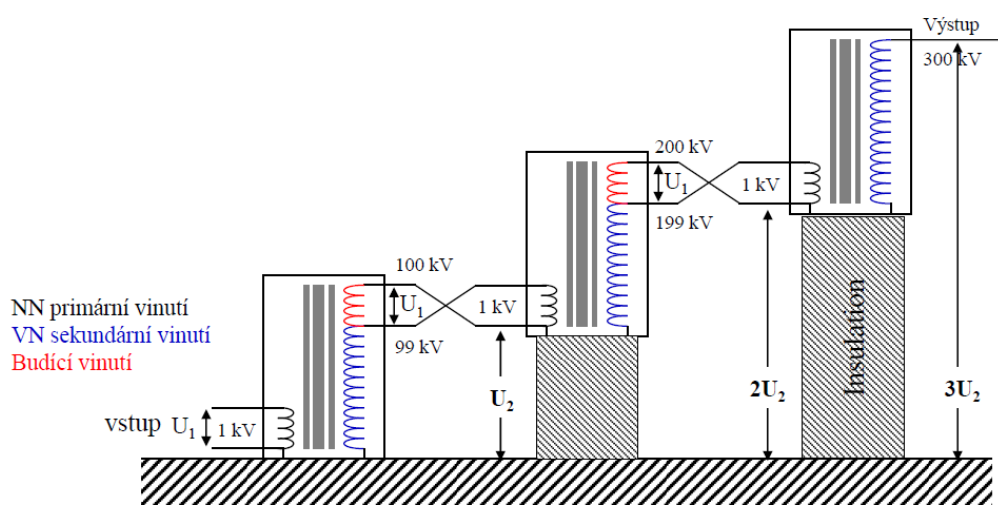
kde I_2 je zatěžovací proud celé kaskády a U_2 je výstupní napětí jednoho stupně, potom výkon k -tého stupně je:

$$S_k = S_n \cdot (n + 1 - k) \quad (3)$$

Celkový výkon kaskády je roven:

$$S_{celk} = \sum_{k=1}^n S_k = S_n \cdot [(n) + (n-1) + (n-2) + \dots + 1] \quad (4)$$

S počtem stupňů klesá účinnost kaskády, proto kaskády o více jak třech stupních nejsou příliš časté. [1]



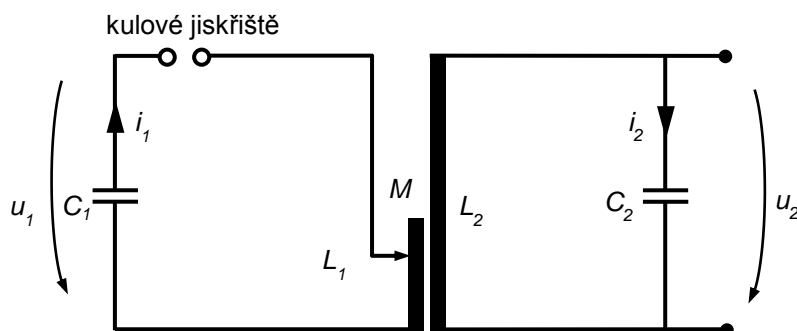
Obr. 2 Zapojení třístupňového kaskádního transformátoru [2]

1.2.3 Teslův transformátor

Teslův transformátor je typ rezonančního transformátoru, generuje vysokofrekvenční vysoké napětí. Princip Teslova transformátoru vychází ze vztahu pro indukované napětí v závitě:

$$u_i = 4,44 \cdot \Phi \cdot f, \quad (5)$$

kde Φ je magnetický tok a f je frekvence. S rostoucím kmitočtem roste napětí na sekundární straně transformátoru, rostou však i ztráty v magnetickém obvodu. [1]



Obr. 3 Náhradní schéma Teslova transformátoru

Kondenzátor C_1 se nabíjí stejnosměrným napětím. Když dosáhne přeskokové hodnoty kulového jiskřiště, dochází k výboji, primární obvod se rozkmitá na rezonanční frekvenci a kmity se přenáší přes vzduchový, případně olejový transformátor do sekundárního obvodu. Pokud je vazba vinutí L_1 a L_2 těsná, energie se přenáší obousměrně. Je žádoucí, aby se energie přenášela pouze směrem z primáru na sekundár. Tento stav nastává při volné vazbě. [1]

Rezonanční frekvence primárního a sekundárního obvodu se má rovnat. Tedy:

$$f_1 = f_2 \quad (6)$$

$$\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_2}} \quad (7)$$

Z toho plyne:

$$L_1 \cdot C_1 = L_2 \cdot C_2 \quad (8)$$

Rezonance se nastavuje změnou indukčnosti L_1 , zvláště pro každý zkoušen objekt. Vrcholové výstupní napětí se reguluje nastavením doskoku na kulovém jiskřišti. Chceme-li určit hodnotu výstupního napětí, vyjdeme z energií v kondenzátorech C_1 a C_2 , které se rovnají:

$$\frac{u_1^2 \cdot C_1}{2} = \frac{u_2^2 \cdot C_2}{2} \quad (9)$$

Dostáváme výstupní napětí:

$$u_2 = u_1 \cdot \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \quad (10)$$

Pomocí Teslova transformátoru lze dosáhnout napětí až v řádu jednotek MV s kmitočty 10 kHz až 100 kHz. Činnosti, při kterých se Teslův transformátor využívá, jsou spíše experimentálního charakteru. [1]

1.3 Zdroje stejnosměrného napětí

Stejnoseměrným vysokým napětím se zkouší izolační systémy zařízení s vysokou kapacitou.

1.3.1 Usměrňovače

Vysoké stejnosměrné napětí lze získat usměrněním střídavého proudu. Pro usměrnění slouží usměrňovací ventily:

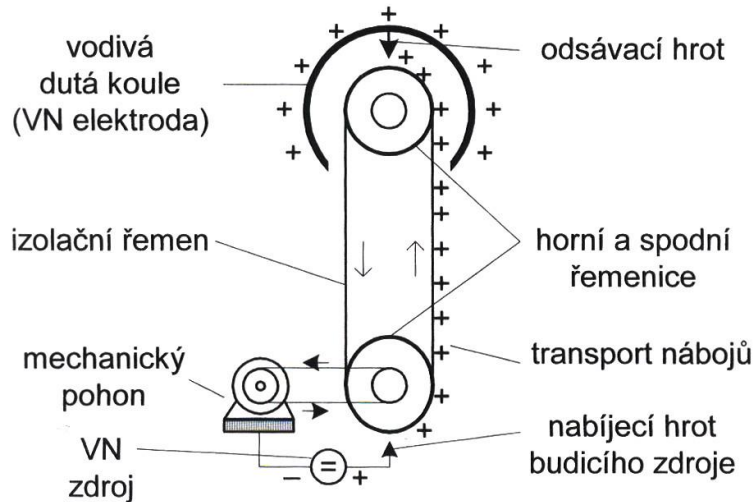
- polovodičové;
- vysokovakuové;
- rtuťové;
- plynem plněné.

Pro větší proudy, řádově jednotky A, se do 10 kV používají rtuťové usměrňovače. Vysokovakuové elektronkové ventily mohou pracovat až do 100 kV, jejich nevýhodou je ale nutnost žhavení katod a tím pádem větší spotřeba energie. Nejvíce používané jsou polovodičové diody.

Usměrňovače obecně zmenšují účinnost vysokonapěťového zdroje, nejsou proto vhodné pro výkonové aplikace. [1]

1.3.2 Van de Graaffův generátor

Van de Graaffův generátor spadá do skupiny elektrostatických zdrojů, které při své činnosti využívají první Maxwellovu rovnici, tedy že mechanickým přemístěním nábojů lze získat v okolí elektromagnetické pole. Jsou to vůbec nejstarší známé elektrické stroje. Nevýhodou elektrostatických zdrojů je jejich velká citlivost na vlhkost vzduchu. [4]



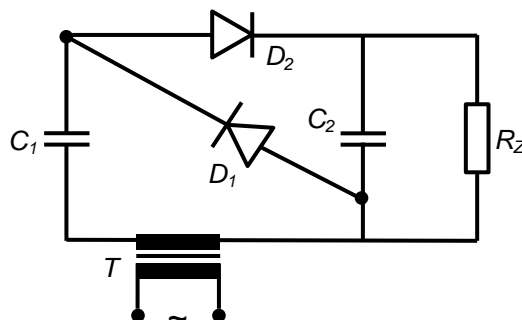
Obr. 4 Princip Van de Graaffova generátoru [LYSENKO]

Van de Graaffův generátor obsahuje izolační řemen, který je poháněn po dvou řemenicích mezi dvěma hrotovými elektrodami. Pás je nabíjen ze spodního koronujícího hrotu, odkud jsou náboje oběhem pásu transportovány k hornímu hrotu, a ten je odsává na vodivou dutou elektrodu. Povrchový náboj duté koule vůči zemi se trvale zvyšuje, až nastane vyrovnání sršivým výbojem nebo přeskokem. [4]

Van de Graaffův generátor se staví do napětí 10 MV a výkonů řádově desítek kW. [4]

1.3.3 Stejnoseměrná kaskáda

Princip stejnosměrné kaskády lze demonstrovat schématem zapojení jednoho stupně kaskády.



Obr. 5 Jeden stupeň stejnosměrné kaskády, T je transformátor, R_z je zátěž

Přes transformátor je obvod napájen sinusovým napětím, začne jím protékat proud, který přes diodu D_1 nabíjí kondenzátor C_1 . V intervalech, kdy je napětí na kondenzátoru C_1

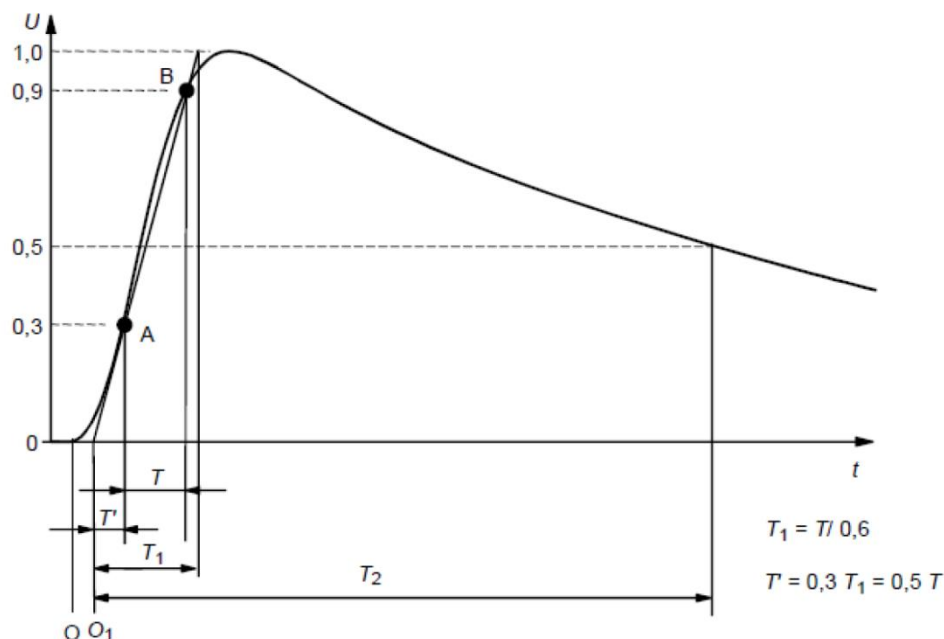
spolu s napětím zdroje větší než napětí na kondenzátoru C_2 , se otevírá dioda D_2 a je dobíjen kondenzátor C_2 . [1]

Stejnosměrné kaskády se vyrábějí pro napětí až 2 MV při proudech do 100 mA. [1]

1.4 Zdroje impulzního napětí

1.4.1 Impulzní napětí

Bylo zjištěno, že atmosférické výboje vedou ke vzniku přepětí, které má obecně aperiodický přechodný charakter, tvoří impuls s velmi rychlým nárůstem do vrcholové hodnoty a následným pomalejším poklesem k nule. Pro účely zkušebnictví se definují parametry křivky impulzního napětí. Doba čela T_1 je parametr definovaný jako $1/0,6$ násobek intervalu T mezi okamžiky, kdy impuls dosáhne 30 % a 90 % své vrcholové hodnoty. Doba půltýlu T_2 je časový interval mezi zdánlivým počátkem O_1 a bodem, kdy křivka impulzního napětí klesla na polovinu vrcholové hodnoty. Zdánlivý počátek O_1 je dán průsečíkem přímky proložené referenčními body A a B v čele křivky s časovou osou. Grafické znázornění je vidět na obrázku 6. [3]



Obr. 6 Doba čela a doba půltýlu [10]

Impulzní napětí je dále charakterizováno polaritou, vrcholovou hodnotou a dobou trvání, která je obvykle v řádech několika desítek μs . [5]

Jako *atmosférické impulzní napětí* je označováno impulzní napětí s dobou čela kratší než 20 μs . [3]

1.4.2 Normalizovaný atmosférický impulz napětí

Zkoušky atmosférickým impulzním napětím se provádí pomocí impulzu, který má napodobovat namáhání atmosférickým přepětím. Pro tento účel byl definován tzv. *normalizovaný atmosférický impulz napětí*, hladký plný atmosférický impulz napětí s dobou čela 1,2 μs a dobou půltýlu 50 μs . Někdy je označován jen jako „impulz 1,2/50“. Doba čela a doba půltýlu se vypočítávají z křivky zkušebního napětí a jsou pro ně dovoleny tyto odchylky:

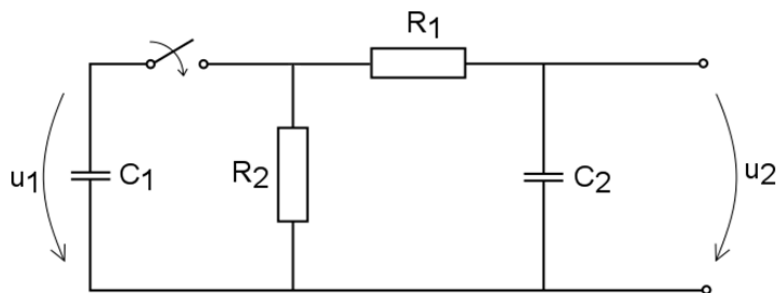
- doba čela $\pm 30 \%$
- doba půltýlu $\pm 20 \%$

Pro vrcholovou hodnotu zkušebního napětí se akceptuje odchylka v rozmezí $\pm 3 \%$. [3]

Ve vrcholu impulzního napětí obvykle dochází k nárůstu amplitudy v důsledku tlumených oscilací. Tyto tlumené oscilace jsou způsobené indukčností obvodu a někdy jim nelze zabránit ve velkých obvodech nebo při zkouškách objektů s velkou indukčností. Připouští se relativní velikost překmitu ve vrcholu maximálně $+ 10 \%$. [3]

1.4.3 Princip impulzního generátoru

Impulzní napětí je obvykle vytvářeno impulzním generátorem, který je realizován určitým počtem kondenzátorů, které jsou paralelně nabíjeny ze zdroje stejnosměrného napětí, a poté v sériovém zapojení vybíjeny do zkušebního obvodu. [3]



Obr. 7 Zapojení impulzního generátoru, u_1 je napětí na činné kapacitě, u_2 je napětí na zatěžovací kapacitě a zároveň výstupní napětí generátoru. Kulové jiskřiště je zde nahrazeno spínačem.

Princip činnosti lze nejlépe demonstrovat na schématu jednostupňového impulzního generátoru. Zapojení dle obrázku 7 se skládá ze dvou kapacit a dvou odporů. C_1 je tzv. činná kapacita, C_2 zatěžovací kapacita, R_1 čelní odpor a R_2 týlní odpor. Činná kapacita se nabije ze stejnosměrného zdroje, náboj se přenesení přes jiskřiště do úpravného obvodu tvořeného prvky R_1 , R_2 a C_2 , který vytváří napětí do impulzního tvaru. Na zatěžovací kapacitě potom dostáváme výstupní chtěné impulzní napětí.

1.4.4 Simulace jednostupňového impulzního generátoru

Tvar výstupního napětí takového jednostupňového generátoru lze namodelovat pomocí soustavy diferenciálních rovnic popisující elektrický obvod generátoru. Vyjděme z prvního a druhého Kirchhoffova zákona:

$$-C_1 \cdot \frac{du_1}{dt} = C_2 \cdot \frac{du_2}{dt} + \frac{u_1}{R_2} \quad (11)$$

$$u_1 = R_1 \cdot C_2 \frac{du_2}{dt} + u_2 \quad (12)$$

Rovnice (11) je zápis prvního Kirchhoffova zákona pro uzel nacházející se mezi prvky C_1 , R_1 a R_2 . Rovnice (12) je zápis druhého Kirchhoffova zákona pro smyčku obsahující prvky C_1 , R_1 a C_2 . Napětí u_1 a u_2 jsou časově závislé neznámé veličiny. Jejich derivace podle času si označíme čárkovaně:

$$-C_1 \cdot u_1' = C_2 \cdot u_2' + \frac{u_1}{R_2} \quad (13)$$

$$u_1 = R_1 \cdot C_2 \cdot u_2' + u_2 \quad (14)$$

Výsledky je možné získat aplikováním některé numerické metody pro řešení obyčejných diferenciálních rovnic. Zvolme například metodu Runge-Kutta implementovanou do prostředí MATLAB pod jménem „ode45“. Pro použití této metody potřebujeme mít rovnice připravené ve tvaru:

$$u_1' = f(u_1, u_2) \quad (15)$$

$$u_2' = g(u_1, u_2) \quad (16)$$

Z našich rovnic tedy vyjádříme u_1' a u_2' :

$$u_1' = -\frac{C_2}{C_1} \cdot u_2' - \frac{u_1}{R_2 C_1} \quad (17)$$

$$u_2' = \frac{u_1}{R_1 C_2} - \frac{u_2}{R_1 C_2} \quad (18)$$

A dosadíme-li z rovnice (18) do rovnice (17) za u_2' , dostáváme soustavu v požadovaném tvaru:

$$u_1' = -\frac{C_2}{C_1} \cdot \left(\frac{u_1}{R_1 C_2} - \frac{u_2}{R_1 C_2} \right) - \frac{u_1}{R_2 C_1} \quad (19)$$

$$u_2' = \frac{u_1}{R_1 C_2} - \frac{u_2}{R_1 C_2} \quad (20)$$

V MATLABu nejprve vytvoříme funkci, která bude obsahovat rovnice ve výsledném tvaru (19) a (20) a následně vytvoříme skript, ve kterém na tuto funkci aplikujeme metodu „ode45“, čímž získáme matici výsledků s hodnotami napětí u_1 a u_2 pro jednotlivé časové okamžiky. Nás zajímá především průběh výstupního napětí generátoru, tedy vypočtené hodnoty u_2 v závislosti na čase.

1.4.5 Algoritmus řešení a vykreslení výsledného impulzního napětí

difrov.m

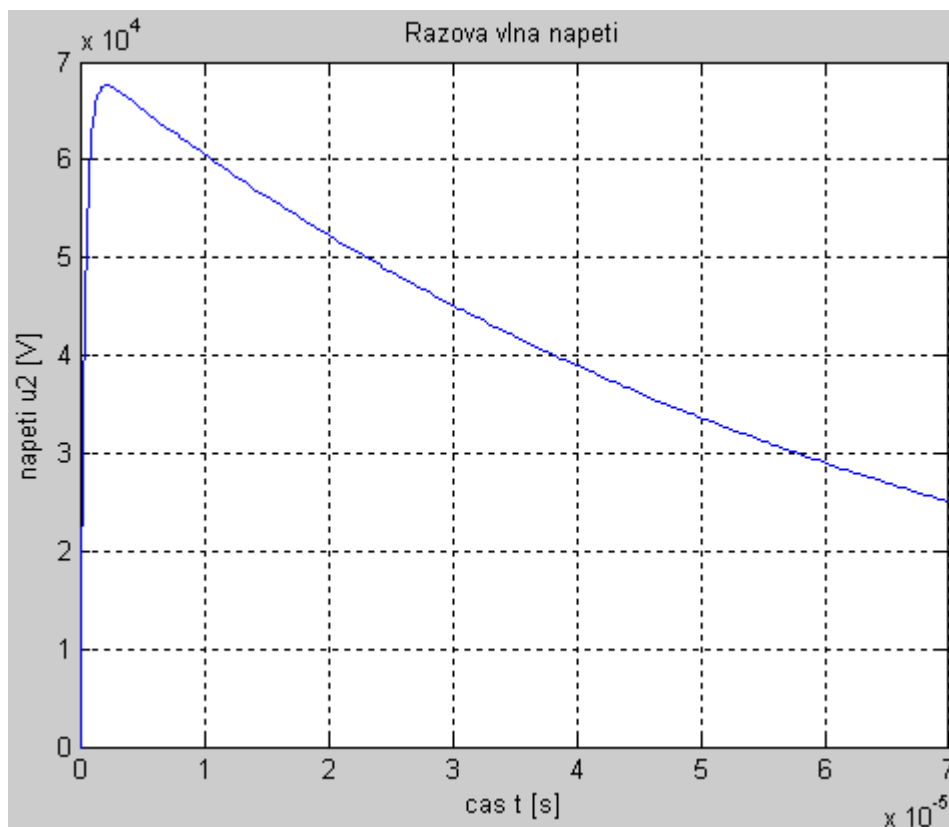
```
function pom=difrov(t,u)
% u(1) != u1
% u(2) != u2
C1=80e-9;      % def. C1 = 80 [nano F]
C2=6e-9;       % def. C2 = 6 [nano F]
R1=73;         % def. R1 = 73 [Ohm]
R2=790;        % def. R2 = 790 [Ohm]
% POPIS SCHEMATU ROVNICEMI
pom=[-(C2/C1)*(u(1)/(R1*C2)-u(2)/(R1*C2))-u(1)/(R2*C1); % u1' = ...
      u(1)/(R1*C2)-u(2)/(R1*C2)]; % vyjadreni u2' = ...
```

vyres.m

```
T0 = 0;          % start v case 0 [s]
T1 = 4e-6;      % chci resit az do casu 70 [mikro s]
u10 = 75000;    % 1. poc. podm.: napeti 75 [kV] na C1 v case 0
u20 = 0;        % 2. poc. podm.: napeti 0 [V] na C2 v case 0
% aplikovani numericke metody pro ziskani hodnot u1, u2
[t,u12] = ode45(@difrov, [T0 T1], [u10 u20]);
% u12(:,1) = u1
% u12(:,2) = u2
plot(t,u12(:,2)); % vykresleni napeti u2 [V]
title('Razova vlna napeti');
grid on;
xlabel('cas t [s]');
ylabel('napeti u2 [V]');
```

Vstupními hodnotami metody jsou počáteční čas T_0 a koncový čas T_1 a počáteční podmínky, kterými jsou číselné hodnoty u_{10} a u_{20} v počátečním čase. Počáteční čas T_0 se obvykle volí 0 s, koncový čas T_1 v případě impulzního napětí v řádech desítek μ s, počáteční napětí u_{10} představuje nabíjecí napětí generátoru, to bývá řádově desítky až stovky kV a počáteční napětí u_{20} se rovná 0 V.

Postup modelování výstupního napětí generátoru předpokládá, že známe hodnoty prvků C_1 , C_2 , R_1 a R_2 , ze kterých se obvod generátoru skládá. Kapacity C_1 a C_2 na něm bývají pevně dané, zatímco odpory R_1 a R_2 lze měnit. Z toho plyne, že tvar výstupního napětí u daného generátoru jsme schopni ovlivnit změnou čelního a týlního odporu.

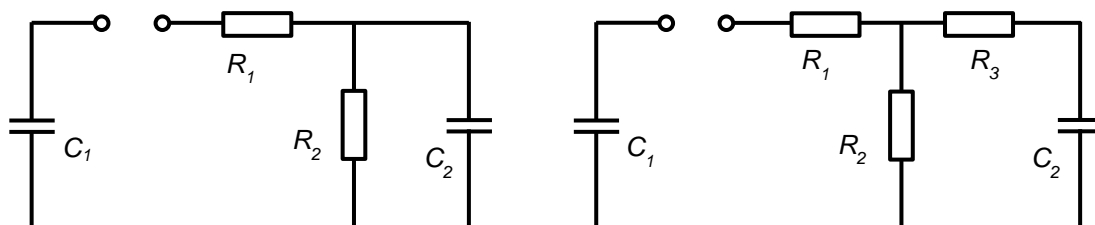


Obr. 8 Výsledkem simulace impulzního generátoru v prostředí MATLAB je impulz 1,2/50.

Jiný způsob simulace impulzního generátoru je ukázán v příloze A, tentokrát pomocí modelačního nástroje DYNAST.

1.4.6 Alternativní zapojení impulzního generátoru

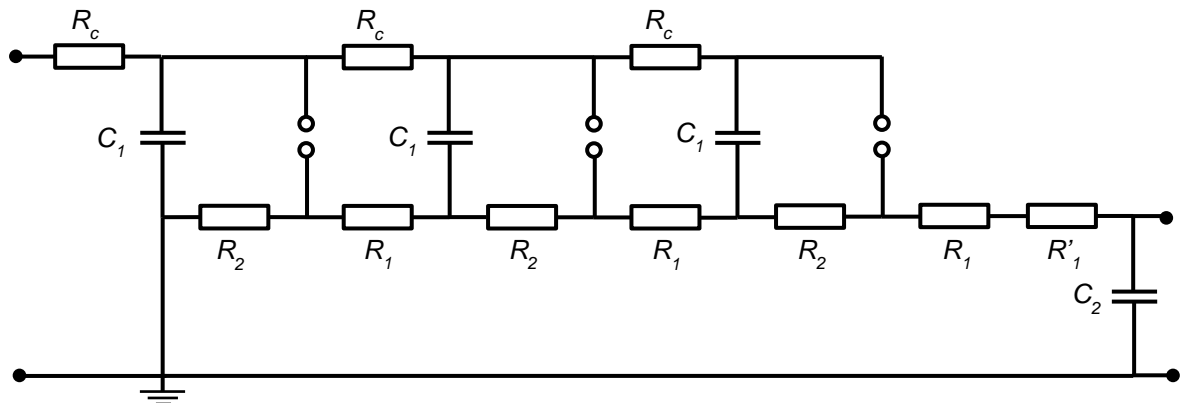
Literatura uvádí postup, jakým lze k daným hodnotám činné a zatěžovací kapacity získat takové hodnoty odporů, aby generátor na svém výstupu dával impulzní napětí. Způsob výpočtu parametrů se liší pro různá zapojení impulzního generátoru. Jiná zapojení jednostupňového generátoru jsou znázorněna na obrázcích 8 a 9. [5]



Obr. 9 Jednostupňový impulzní generátor, jiné zapojení **Obr. 10** Čelní odpor může být rozdělen do dvou větví

Jednostupňové impulzní generátory se používají v oblasti EMC jako testery pro zkoušky elektromagnetické odolnosti do napětí 4 kV dle normy ČSN EN 61000-4-5 ed. 3:2015. [6]

Pro dosažení vysoké amplitudy je třeba použít víceúrovňové zapojení. Ve víceúrovňovém zapojení se jednotlivé stupně nabíjí paralelně a v okamžiku, kdy je na spouštěcích jiskřičkách dosaženo přeskokového napětí, napětí jednotlivých stupňů jsou spojeny do série a dojde k vybití. [5]



Obr. 11 Příklad zapojení tříúrovňového impulzního generátoru. R_c omezuje proud zdroje, C_1 je nabíjená činná kapacita, C_2 je zatěžovací (úpravná) kapacita, R_1 a R'_1 je čelní (tlumící) odpor, R_2 je týlní (vyprazdňovací) odpor

2 Měření impulzního napětí

2.1 Termíny a definice

Měřicí systém je celkový souhrn zařízení pro měření vysokého napětí. Jeho součástí jsou následující komponenty:

- převodní zařízení;
- vodiče pro připojení převodního zařízení a pro spojení se zemí;
- přenosový systém;
- měřicí přístroj;
- software pro získávání nebo výpočet naměřených hodnot. [7]

Převodní zařízení je zařízení pro převod měřené veličiny na veličinu kompatibilní s použitým měřicím přístrojem. Norma ČSN EN 60060-2 ed. 2:2011 uvádí tato převodní zařízení:

- napěťový dělič – vstupní vysoké napětí se přikládá na celé zařízení, výstupní napětí se odebírá z nízkonapěťové části; napěťové děliče se člení podle typů a uspořádání použitých prvků, např. na odporový, kapacitní, odporově kapacitní;
- napěťový transformátor;
- převodní impedance napětí;
- sonda pro elektrické pole – pro měření amplitudy a tvaru vlny elektrického pole. [7]

Při měření impulzního napětí se jako převodní zařízení většinou používá napěťový dělič.

Přenosový systém přenáší signál z převodního zařízení k měřicímu přístroji. Obvykle se skládá z koaxiálního kabelu se zakončovací impedancí. Může ale obsahovat i zesilovače, útlumové články nebo jiná zařízení a může být také již zahrnut v převodním zařízení nebo v měřicím přístroji. [7]

Konstanta měřicího systému je číslo, kterým se násobí údaj odečtený na měřicím přístroji, aby se získala skutečná hodnota veličiny na vstupu měřicího systému. Měřicí systém může mít pro jednotlivé rozsahy různé konstanty. [7]

Kalibrace je soubor úkonů, kterými se pomocí etalonů určí vztah mezi údajem a výsledkem měření. Výsledek kalibrace se někdy vyjadřuje ve formě kalibrační křivky. [7]

2.2 Měřicí metody

2.2.1 Přímé metody

Metody používané pro měření vysokého napětí lze rozdělit na přímé a nepřímé. Jako přímé metody se používají především přístroje založené na působení elektrického pole. Tyto přístroje měří efektivní hodnotu napětí, nazýváme je elektrostatické voltmetry. Dále sem patří rotační voltmetry a měřicí kulová jiskřiště. V praxi se téměř vždy používají nepřímé metody, které vycházejí ze vztahu měřeného napětí k jiným veličinám. [5]

2.2.2 Nepřímé metody

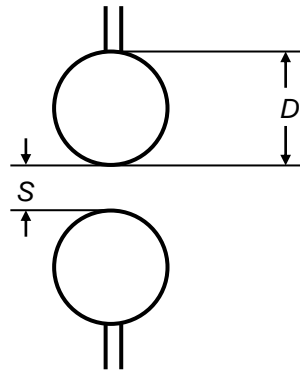
Příklady nepřímých měřicích metod:

- měřicí vinutí (transformátor) + měřicí přístroj (voltmetr);
 - dělič napětí + měřicí přístroj (voltmetr);
 - měřicí přístroj (ampérmetr) v sérii s rezistorem;
 - měřicí přístroj (ampérmetr) měřící usměrněný proud procházející kondenzátorem.
- [5]

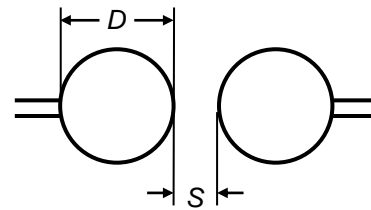
Abychom mohli nepřímé měřicí metody využívat, musí být ocejchovány pomocí některé přímé metody měření. V laboratořích vysokého napětí se pro tento účel používají zpravidla měřicí kulová jiskřiště. [8]

2.3 Kulové jiskřiště

Kulová jiskřiště jsou uznávaná jako normalizovaná měřicí zařízení určena pro kontrolu funkce měřicích systémů. Kulové jiskřiště pro měření vrcholových hodnot napětí vyhovující normě ČSN EN 60052:2003 se nazývá **normalizované kulové jiskřiště**. Skládá se ze dvou shodných kovových koulí o průměru D , dřívků, izolačních držáků, nosné konstrukce, přívodních vodičů a ovládacích zařízení. Jsou normalizované tyto hodnoty průměrů D : 2; 5; 6,25; 10; 12,5; 15; 25; 50; 75; 100; 150; 200 cm. Průměry koulí se od jmenovité hodnoty smí lišit maximálně o 2 %. Koule mohou mít buď svislé, nebo vodorovné uspořádání. Doskok mezi koulemi se označuje S . [9]



Obr. 12 Svislé uspořádání kulového jiskřiště



Obr. 13 Vodorovné uspořádání kulového jiskřiště

Obvod kulového jiskřiště musí být uspořádán tak, aby při zkušebním napětí nevznikl přeskok na jiné předměty nebo viditelný předvýboj na přívodu vysokého napětí, dřívku nebo na jiných uzemněných předmětech. [9]

Kulovým jiskřištěm lze měřit v mezích doskoků od $0,05 \cdot D$ do $0,5 \cdot D$ pro střídavá a impulzní napětí. Stejnoseměrná napětí musí být doskok do $0,4 \cdot D$. Tehdy je zajištěno, že pole mezi koulemi je homogenní. [5]

Dbáme-li ustanovení normy, je přesnost měření $\pm 5\%$ při měření stejnosměrných napětí. Průměry koulí a jejich dovolené odchylky jsou v normě. [5]

Vrcholové hodnoty napětí lze pomocí kulového jiskřiště dostatečně přesně a rychle měřit za předpokladu, že doskok lze jemně nastavovat.

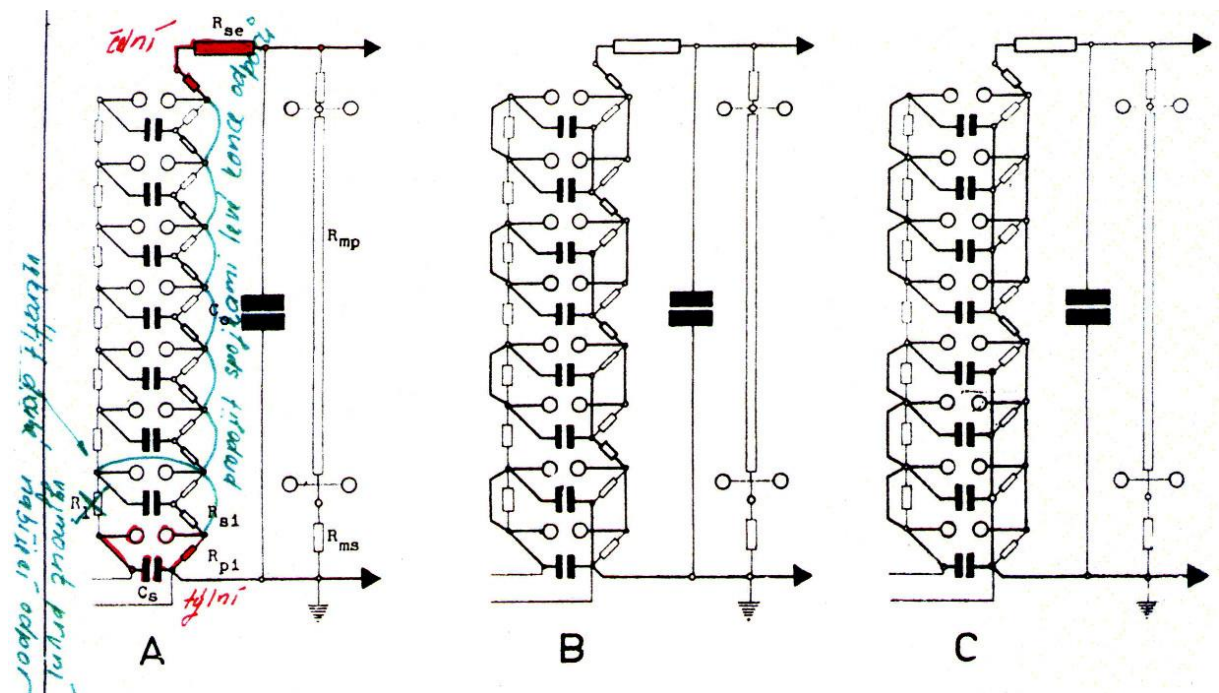
3 Experimentální ověření vlastností impulzního generátoru

3.1 Popis měřicí sestavy

Zařízení, které je předmětem našeho měření, je osmistupňový impulzní generátor značky Emil Haefely & Cie. AG, rok výroby 1970. Štítkové hodnoty:

- jmenovité napětí 75 kV
- stálý jmenovitý proud 10 mA
- napájecí napětí 220 V
- spotřeba energie 2250 VA

Jmenovité napětí 75 kV odpovídá výstupnímu napětí jednoho stupně. V případě zapojení všech osmi stupňů je tedy maximální dosažitelné výstupní napětí celého generátoru 600 kV. Zařízení umožňuje realizovat zapojení pro max. napětí 300 kV a zapojení pro max. 150 kV, při kterých jsou některé stupně odlehčeny. Pro kalibraci bylo s ohledem na potřebné využití v laboratoři VN a optimální citlivosti zvoleno zapojení pro max. napětí 300 kV (zapojení B na obrázku 14).



Obr. 14 Schémata možných zapojení impulznímu generátoru Haefely, dodané od výrobce. A - zapojení pro max. napětí 600 kV; B - zapojení pro max. napětí 300 kV; C - zapojení pro max. napětí 150 kV.

Na impulzním generátoru se dá regulovat rychlost nabíjení jednotlivých stupňů a vzdálenost resp. doskok spouštěcích jiskřišť mezi jednotlivými stupni. Právě nastavený doskok spouštěcích jiskřišť určuje velikost výstupního napětí generátoru. Čím je doskok větší, tím se jednotlivé stupně nabijí na větší napětí a tím je větší i celkové výstupní napětí.

Řetězec našeho měřicího systému se tedy skládá ze samotného impulzního generátoru, ke kterému je od výrobce Haefely navržen kapacitní dělič pro impulzní napětí téhož data výroby, a dále z koaxiálního kabelu se zakončovací impedancí 75Ω , který přivádí signál z výstupu děliče na vrcholový voltmetr.

Kromě vrcholové hodnoty výstupního impulzního napětí nás zajímá hodnota stejnosměrného nabíjecího napětí, kterou měříme na jednom ze stupňů generátoru přes odporový dělič pomocí digitálního multimetru.

Účelem naší kalibrace je zjistit, jakému skutečnému napětí odpovídají údaje odečtené na měřidlech v obou měřicích větvích, jak na výstupu, tak na vstupu impulzního generátoru.

Pro kalibraci našeho měřicího systému využijeme kulové jiskřiště svislého uspořádání s průměrem koulí $D = 50$ cm. Toto kulové jiskřiště použijeme jako přímou metodu měření. Norma ČSN EN 60052:2003 stanovuje hodnoty přeskokových napětí normalizovaných kulových jiskřišť odpovídající jednotlivým doskokům. Tabulka kulových jiskřišť je uvedena v příloze B. Tyto hodnoty platí za normalizovaných atmosférických podmínek při teplotě $t_0 = 20$ °C a tlaku $b_0 = 101,3$ kPa. Za jiných atmosférických podmínek při obecné teplotě t a tlaku b se přeskokové napětí obdrží vynásobením tabulkové hodnoty korekčním činitelem na hustotu vzduchu definovaným vztahem:

$$\delta = \frac{b}{b_0} \cdot \frac{273+t_0}{273+t} \quad (21)$$

Lze dosadit za t_0 a b_0 , potom dostáváme korekční činitel:

$$\delta = \frac{b}{101,3} \cdot \frac{273+20}{273+t} \quad (22)$$

3.2 Postup kalibrace

Pro nastavování doskoku je měřicí kulové jiskřiště vybaveno elektrickým pohonem s vyznačenou stupnicí v milimetrech. Před zahájením práce s kulovým jiskřištěm je potřeba ověřit pomocí délkového etalonu, zda údaj na stupnici odpovídá realitě.

Zkontrolujeme zapojení impulzního generátoru, zapojení měřicích větví a připojíme kulové jiskřiště na výstup impulzního generátoru paralelně s napěťovým děličem. Při

manipulaci s VN zařízeními dbáme zásad bezpečnosti práce a po uvedení do chodu dodržujeme bezpečné vzdálenosti.

Na měřicím kulovém jiskřišti si nastavíme doskok, pro který známe hodnotu přeskokového napětí a pro tento doskok potřebujeme najít takové napětí, aby k přeskoku došlo s 50 % pravděpodobností. Tím budeme mít zajištěno, že amplituda impulzního napětí se bude rovnat právě hodnotě přeskokového napětí. Toto tzv. 50 % napětí nebo též polovinové napětí hledáme pomocí statistického vyhodnocování, z nejméně deseti uskutečněných výbojů jich musí polovina způsobit na kulovém jiskřišti přeskok. Pokud se počet nepřeskoků a přeskoků nerovná, musíme zvýšit, nebo snížit nabíjecí napětí generátoru, dokud polovinové napětí nenalezneme. Pro takto nastavený impulz si zapíšeme údaje z měřicích přístrojů na vstupní i výstupní větví. Kvůli zajištění vyšší reprodukovatelnosti údaje z voltmetrů odečítáme při impulzech, kdy na kulovém jiskřišti nedošlo k přeskoku. Proto je vhodné během odečítání hodnot přeskokům zamezit zvětšením doskoku kulového jiskřiště. Dále je možné zvýšit přesnost odečítaných hodnot nabíjecího napětí zpomalením rychlosti nabíjení kvůli omezené rychlosti vzorkování digitálního voltmetru. Údaje z vrcholového voltmetru si zapíšeme pro všechny čtyři nastavitelné rozsahy. Každou hodnotu změříme alespoň pětkrát a jako výslednou hodnotu bereme aritmetický průměr z provedených měření.

Měříme pro doskoky od 20 mm do 110 mm s kroky dle tabulky kulových jiskřišť, kterou máme k dispozici. Naměřené hodnoty si zapisujeme do tabulky, kde každý obsahuje tyto hodnoty: doskok S , teplota t , tlak b , tabelované přeskokové napětí U_{tab} , korigované přeskokové napětí U_{kor} , přičemž $U_{kor} = U_{tab} \cdot \delta$, nabíjecí napětí U_{nab} , údaje vrcholového voltmetru pro jednotlivé rozsahy $U_{vv} 8x$, $U_{vv} 4x$, $U_{vv} 2x$, $U_{vv} 1x$.

Z výsledných hodnot sestojíme kalibrační křivky $U_{kor}(U_{nab})$ a $U_{kor}(U_{vv})$ opět pro jednotlivé rozsahy vrcholového voltmetru. Změřené kalibrační body se v grafu neprokládají, ale spojují.

Při práci s impulzním generátorem lze pro nastavování amplitudy výstupního napětí využít jednak kalibrační křivky a jednak dopočtenou tabulku pro napětí odstupňované po kroku 5 kV. Hodnoty pro jednotlivá napětí po 5 kV byly spočteny v Excelu s využitím funkcí SLOPE a INTERCEPT pro nalezení směrnice přímky vždy pro příslušný interval mezi dvěma změřenými body, do kterého spadá počítané napětí.

Tab. 2 Výsledky kalibrace měřicího systému zpracované do tabulek s krokem 5 kV

U_{kor} [kV]	U_{nab} [V]	$U_{vv\ 8x}$ [V]	$U_{vv\ 4x}$ [V]	$U_{vv\ 2x}$ [V]	$U_{vv\ 1x}$ [V]	U_{kor} [kV]	U_{nab} [V]	$U_{vv\ 8x}$ [V]	$U_{vv\ 4x}$ [V]	$U_{vv\ 2x}$ [V]	$U_{vv\ 1x}$ [V]
55	15,3	13,7	27,6	54,9	112,1	170	47,1	40,6	81,1	164,1	-
60	16,8	14,9	29,6	60,0	120,1	175	48,9	41,9	83,4	169,0	-
65	17,9	15,8	31,9	64,3	128,6	180	50,7	43,2	85,7	173,9	-
70	19,0	16,8	34,0	68,1	136,7	185	52,2	44,5	88,3	178,7	-
75	20,3	17,9	36,3	72,4	145,6	190	53,7	45,7	90,8	183,4	-
80	21,7	19,1	38,8	77,5	155,6	195	55,1	46,9	93,2	188,3	-
85	23,2	20,4	41,1	82,4	165,6	200	56,5	48,1	95,5	193,2	-
90	24,6	21,7	43,4	87,1	175,6	205	58,0	49,3	97,8	198,2	-
95	26,1	23,0	45,7	91,9	185,6	210	59,6	50,5	100,5	-	-
100	27,4	24,1	48,2	96,9	-	215	61,2	51,7	103,2	-	-
105	28,8	25,3	50,7	102,0	-	220	62,9	52,9	105,9	-	-
110	30,1	26,4	53,0	106,6	-	225	64,5	54,2	108,6	-	-
115	31,3	27,5	55,2	110,8	-	230	66,1	55,4	111,1	-	-
120	32,6	28,6	57,4	115,2	-	235	67,7	56,7	113,3	-	-
125	34,1	29,9	59,7	120,2	-	240	69,2	58,0	115,5	-	-
130	35,5	31,2	61,9	125,1	-	245	70,7	59,3	117,7	-	-
135	37,0	32,4	64,4	130,0	-	250	72,2	60,6	119,9	-	-
140	38,5	33,5	66,9	134,8	-	255	73,7	61,8	122,7	-	-
145	40,0	34,7	69,4	139,6	-	260	75,2	62,9	125,6	-	-
150	41,4	35,9	71,7	144,5	-	265	76,7	64,1	128,5	-	-
155	42,9	37,0	74,0	149,4	-	270	78,1	65,3	131,4	-	-
160	44,3	38,2	76,4	154,3	-	275	79,6	66,5	134,3	-	-
165	45,7	39,4	78,8	159,2	-						

Měřicí systém impulzního generátoru byl okalibrován pro hodnoty impulzního napětí od 55 kV do 275 kV. Přiblížili jsme se k hranici maximálního výstupního napětí pro zvolený typu zapojení generátoru. Na napětí 275 kV zapůsobila vestavěná tepelná ochrana, při dalším zvyšování napětí by již bylo zařízení vystavováno nebezpečí přetížení.

3.3 Ověření měřicí cesty a vlastností generátoru za účelem vylepšení tvaru impulzu

3.3.1 Vliv způsobu připojení měřicího zařízení

Ke snímání tvaru impulzního napětí jsme použili digitální osciloskop LeCroy WavePro 7300A v kombinaci s vysokoimpedanční pasivní osciloskopickou sondou LeCroy Probe PP005 10:1 pro napětí do 500 V. Sondy jsme připojili na vstup vrcholového voltmetru, kam je koaxiálním kabelem přiváděn signál z děliče napětí. Na obrázcích 15 a 16 jsou

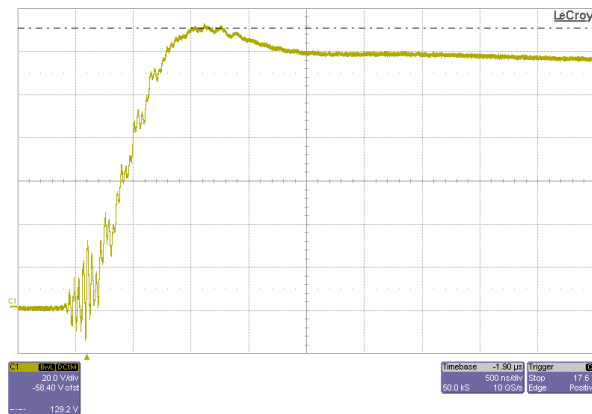
zdokumentovány dva způsoby připojení napěťové sondy. V prvním případě je zemní svorka připojena na měděný zemní pásek. V druhém případě je zemní svorka připojena přímo na kostru konektoru a navíc vodič díky stočení tvoří menší smyčku.



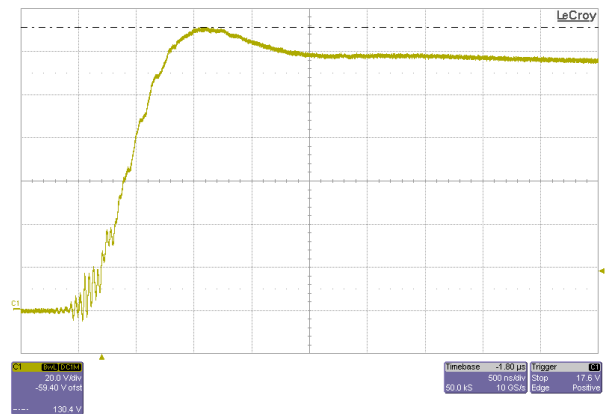
Obr. 15 Konektor koaxiálního kabelu 75 Ω na vstupu vrcholového voltmetru, zemní svorka napěťové sondy připojena na pásek



Obr. 16 Konektor koaxiálního kabelu 75 Ω na vstupu vrcholového voltmetru, zemní svorka připojena na kostru konektoru, vodič obtočen



Obr. 17 Tvar impulzního napětí při zemní svorce na pásku dle obr. 15



Obr. 18 Tvar impulzního napětí při zemní svorce na kostře konektoru s menší smyčkou dle obr. 16

Po přepojení zemní svorky napěťové sondy z pásku na kostru konektoru a zároveň zmenšení smyčky tvořené uzemňovacím kabelem je na čele impulsu patrné zjemnění zákmitů, docílujeme méně zkresleného výsledku.

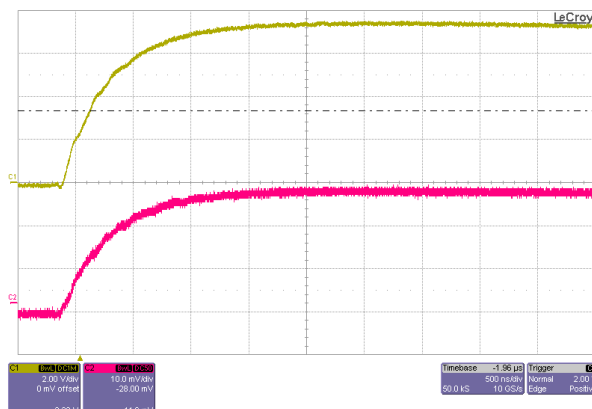
3.3.2 Vliv vlastního impulzního generátoru

Pro srovnání byl nasnímán také tvar impulsu z generátoru EM TEST VCS 500, který je využíván pro účely EMC. Zařízení jsme připojili místo generátoru Haefely na vstup napěťového děliče. Kromě napěťové sondy jsme signál na osciloskop přivedli navíc přímým připojením 50 Ω koaxiálním kabelem s BNC konektorem, ke kterému byl zkonstruován člen impedančního přizpůsobení. Konektor na vstupu vrcholového voltmetru byl upraven tak, aby

se dalo měřit bez napěťové sondy přímým připojením k osciloskopu, musel být v tomto místě zrealizován dělič napětí pro účely měření.



Obr. 19 Zařízení EM TEST VCS 500

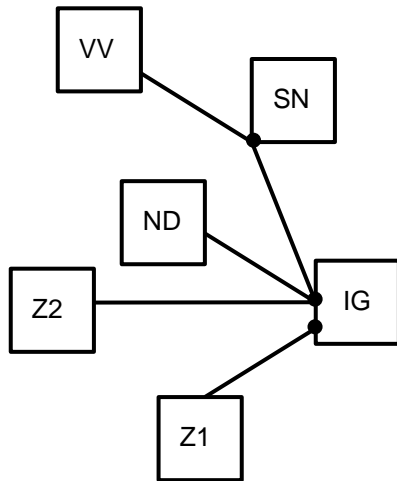


Obr. 20 Impulz 4000 V z testeru VCS 500, horní průběh získán napěťovou sondou, spodní průběh získán přes koaxiální kabel s BNC konektorem

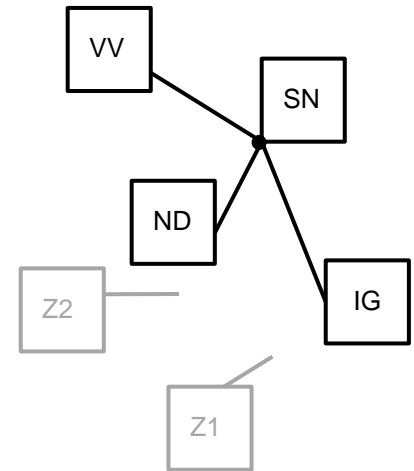
Porovnáním průběhu impulzu z generátoru Haefely na obr. 18 a impulzu z generátoru VCS 500 na obr. 20 lze vysledovat, že zákmity u generátoru Haefely v okamžiku nárůstu impulzu jsou vlastností samotného zařízení, stejně tak překmit ve vrcholu. Přivedení signálu na osciloskop pomocí koaxiálního kabelu s BNC konektorem výsledný tvar nevylepšílo, z křivky je naopak patrný větší podíl šumu.

3.3.3 Vliv zemnicího systému

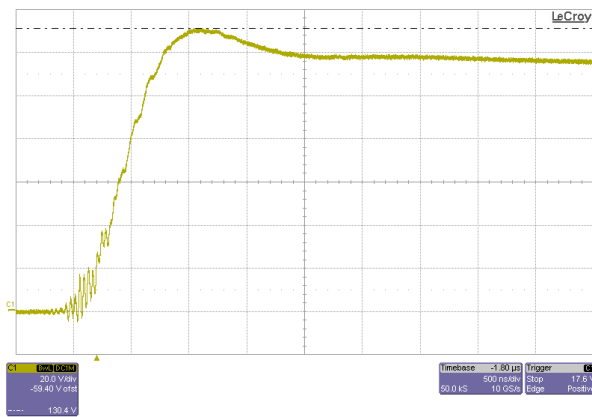
Dále byl zkoumán vliv způsobu uzemnění na výsledný tvar impulzu. Na obrázku 21 je schematicky znázorněn původní stav rozmístění jednotlivých zařízení v laboratoři a propojení jejich zemnicího systému. IG je impulzní generátor Haefely, ND je napěťový dělič, SN je sloupek s napájením (zásuvkami), VV je vrcholový voltmetr, Z1 je zařízení připravené pro zkoušení, Z2 je další zařízení. Uzemnění jednotlivých zařízení je v původním provedení realizováno ve třech různých bodech. Tento systém byl upraven tak, že zemnicí vodiče byly svedeny nejkratší možnou cestou do jednoho společného bodu umístěného na sloupku s napájením a nepoužívaná zařízení byla z tohoto systému vyjmuta zcela. Stav zemnicího systému po úpravě je znázorněn na obrázku 22.



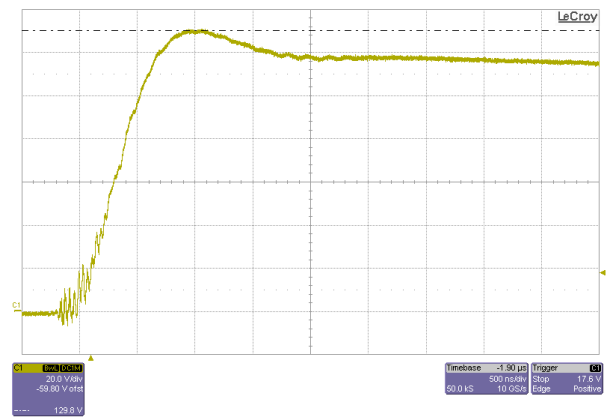
Obr. 21 Původní systém uzemnění



Obr. 22 Upravený systém uzemnění



Obr. 23 Tvar impulzu před úpravou uzemnění



Obr. 24 Tvar impulzu nasnímaný po úpravě uzemnění

Po vyhodnocení lze říci, že změna zemnicího systému měla viditelný vliv na tvar impulzního napětí. Hladkost čela impulzu by vylepšena.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo připravit impulzní generátor pro využití v rámci vědeckého výzkumu, zejména zefektivnit nastavování požadované hodnoty výstupního napětí. To se provádí mechanickým nastavováním doskoku spouštěcích jiskřišť jednotlivých stupňů generátoru. Generátor sám o sobě nedisponuje zpětnou vazbou, která by dávala informaci o parametrech výsledného napěťového impulsu. Pro účely kontroly vyráběného napětí se měří vrcholová hodnota napětí na výstupu a rovněž hodnota nabíjecího napětí na jednom stupni generátoru. Hodnoty z principu nelze měřit plynule, neboť pracujeme s rázy, údaje z přístrojů lze odečítat pouze v okamžicích vrcholu impulsů. Tím je měření a potažmo nastavování požadované úrovně výstupního napětí značně ztíženo.

Pro okalibrování měřícího systému bylo nejprve nutné zvolit vhodné zapojení generátoru. S ohledem na požadované rozsahy bylo zvoleno zapojení používající čtyři stupně z osmi pro max. napětí 300 kV, čímž se zlepšila citlivost nastavování napětí. Samotná kalibrace byla rozpracována jednak pro údaje nabíjecího napětí, které je důležité pro to, abychom věděli jaký doskok nastavit, a jednak pro údaje vrcholového voltmetru, který měří přímo to napětí na, které se posílá na testované zařízení. Vrcholový voltmetr disponuje čtyřmi rozsahy, kalibrace byla provedena zvlášť pro každý rozsah. Z naměřených hodnot byly sestrojeny kalibrační křivky a na základě kalibračních křivek byly připraveny tabulky pro jednotlivé úrovně požadovaných napětí a jím odpovídající úrovně nabíjecích a výstupních napětí. Obsluha tak má při regulaci dvojí kontrolu, což umožňuje rychlé a jednoduché používání generátoru. Hodnoty v tabulkách byly dopočítány v krocích po 5 kV, což činí nastavování dostatečně přesným.

Nad rámec vytyčeného cíle byly vytvořeny matematické modely jednostupňového impulzního generátoru, a to v prostředí MATLAB a zvlášť pomocí simulačního nástroje DYNAST. Tyto modely jsou vhodné například pro použití ve výuce. Na závěr práce byly identifikovány některé vlivy, které mohou ovlivnit hladkost výsledného tvaru impulsu.

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] BLAŽEK, Vladimír a Petr SKALA. *Vysoká napětí a elektrické přístroje. Část I: Vysoké napětí*. Skripta. Brno: VUT v Brně, FEKT, 2003. 74 s. Dostupné také z: <http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/skripta-vysoke-napeti-cast-i-m10824-p1.html>
- [2] LAURENC, Jiří. *Vznik (výroba) vysokého napětí* [online prezentace]. 2010 [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=42082
- [3] ČSN EN 60060-1. *Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: ÚNMZ, 2011. 68 s. Třídící znak 34 5640.
- [4] LYSENKO, Vladimír. *VN zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 248 s. ISBN 978-80-7300-235-0.
- [5] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 3. přeprac. vydání. Praha: SNTL/ALFA, 1982. 304 s. 04-527-82.
- [6] ČSN EN 61000-4-5 ed. 3. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-5: Zkušební a měřicí technika – Rázový impulz – Zkouška odolnosti*. Praha: ÚNMZ, 2015. Třídící znak 33 3432.
- [7] ČSN EN 60060-2 ed. 2. *Technika zkoušek vysokým napětím – Část 2: Měřicí systémy*. Praha: ÚNMZ, 2011. 64 s. Třídící znak 34 5640.
- [8] LAURENC, Jiří. *Zkoušky vysokým napětím: Měření vysokého napětí* [online prezentace]. 2010 [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=42083
- [9] ČSN EN 60052. *Měření napětí pomocí normalizovaných vzduchových kulových jiskřišť*. Praha: ČNI, 2003. 32 s. Třídící znak 34 5651.
- [10] HLAVÁČEK, Jan. *Vysokonapětové zkušebnictví: #3 Napětové zkoušky* [online prezentace]. 2014 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/VNZ/VNZ_3-Napetove_zkousky.pdf

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Simulace impulzního generátoru v prostředí DYNAST

Příloha B: Tabulka kulových jiskřišť

Příloha C: Dokumentace pracoviště v laboratoři VN

Příloha D: Tabulka naměřených hodnot

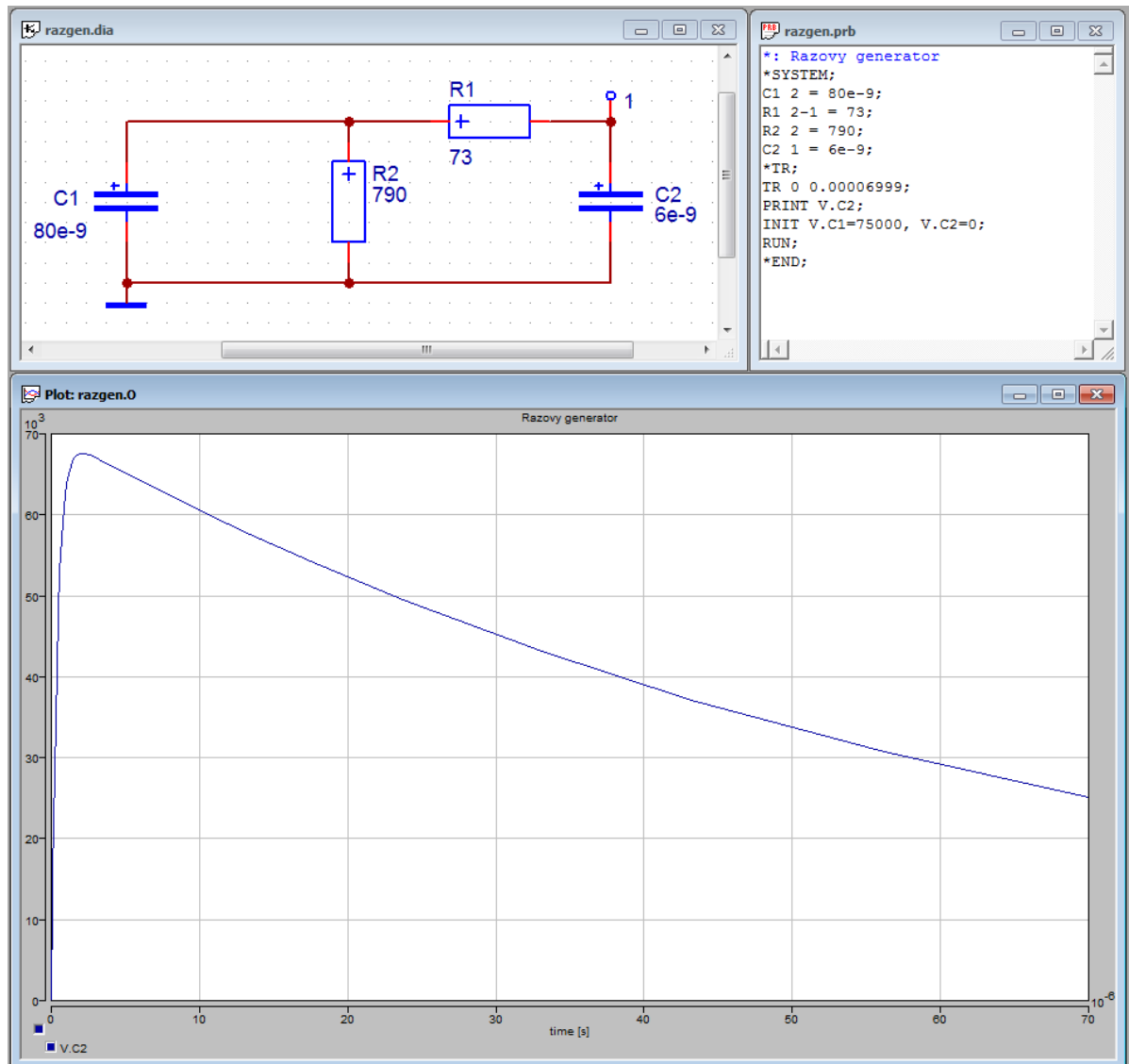
Příloha E: Kalibrační křivka pro vrcholový voltmetr

Příloha F: Kalibrační křivka pro nabíjecí napětí

PŘÍLOHY

Příloha A – Simulace impulzního generátoru v prostředí DYNAST

Model jednostupňového impulzního generátoru vytvořený pomocí nástroje DYNAST. V grafu je vykreslen výsledný impulz 1,2/50.

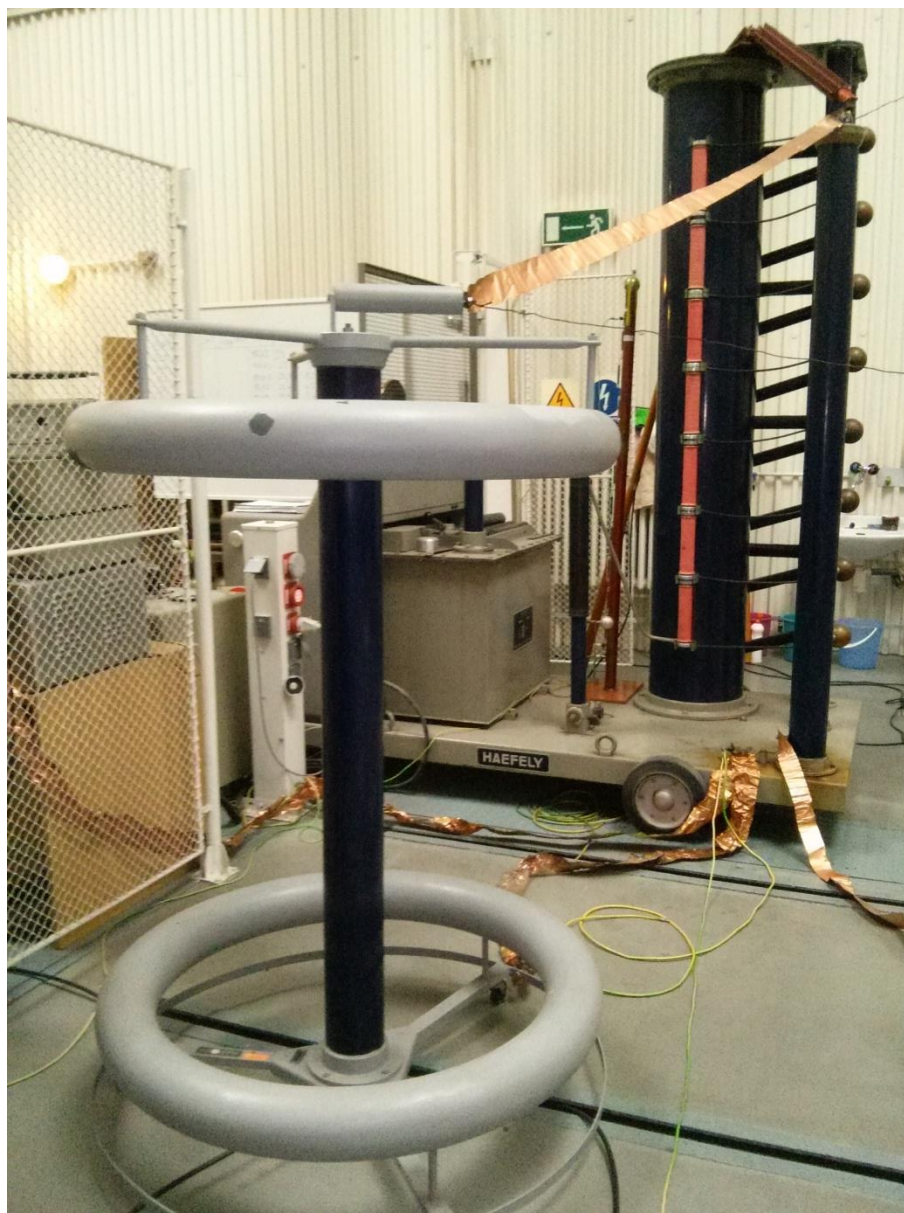


Příloha B – Tabulka kulových jiskřišť

TABULKA KULOVÝCH JISKŘIŠŤ										
VRCHOLOVÉ HODNOTY PŘESKOKOVÉHO NAPĚTÍ (POLOVINOVÉHO RÁZOVÉHO NAPĚTÍ) V KILOVOLTECH										
PLATÍ PRO ATM. PODMÍNKY: 20°C, 101,3 kPa										
Doskok [cm]	PLATÍ PRO STRÍDAVÉ NAPĚTÍ SS. NAPĚTÍ OBOU POLARIT ZÁPORNÉ RÁZOVÉ NAPĚTÍ					PLATÍ PRO Kladná RÁZOVÁ NAPĚTÍ				
	PRŮMĚR KOULÍ [CM]					PRŮMĚR KOULÍ [CM]				
	5	10	15	25	50	5	10	15	25	50
0,5	17,4	16,8	16,8			17,4	16,8	16,8		
0,6	20,4	19,9	19,9			20,4	19,9	19,9		
0,7	23,4	23,0	23,0			23,4	23,0	23,0		
0,8	26,3	26,0	26,0			26,3	26,0	26,0		
0,9	29,2	28,9	28,9			29,2	28,9	28,9		
1,0	32,0	31,9	31,7	31,7		32,0	31,7	31,7	31,7	
1,2	37,6	37,4	37,4	37,4		37,8	37,4	37,4	37,4	
1,4	42,9	42,9	42,9	42,9		43,3	42,9	42,9	42,9	
1,5	45,5	45,5	45,5	45,5		46,2	45,5	45,5	45,5	
1,6	48,1	48,1	48,1	48,1		49,0	48,1	48,1	48,1	
1,8	53,0	53,5	53,5	53,5		54,5	53,5	53,5	53,5	
2,0	57,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,5	59,0	59,0	59,0	59,0
2,2	61,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,0	64,5	64,5	64,5	64,5
2,4	65,5	69,5	70,0	70,0	70,0	69,0	70,0	70,0	70,0	70,0
2,6	(69,0)	74,5	75,5	75,5	75,5	(73,0)	75,5	75,5	75,5	75,5
2,8	(72,5)	79,5	80,5	81,0	81,0	(77,0)	80,5	80,5	81,0	81,0
3,0	(75,5)	84,0	85,5	86,0	86,0	(81,0)	85,5	85,5	86,0	86,0
3,5	(82,5)	95,0	98,0	99,0	99,0	(90,0)	97,5	98,5	99,0	99,0
4,0	(88,5)	105,0	110,0	112,0	112,0	(97,5)	109	111	112	112
4,5		115,0	122,0	122,0	125,0		120	124	125	125
5,0		123	133	137	138		130	136	138	138
5,5		(131)	143	149	151		(139)	147	151	151
6,0		(138)	152	161	164		(148)	158	164	164
6,5		(144)	161	173	177		(156)	168	175	177
7,0		(150)	169	184	189		(163)	178	187	189
7,5		(155)	177	195	202		(170)	187	199	202
8,0			(185)	206	214			(196)	211	214
9,0			(198)	226	239			(212)	233	239
10			(209)	244	263			(226)	254	263
11			(219)	261	286			(238)	273	287
12			(229)	275	309			(249)	291	311
13				(289)	331				(308)	334
14				(302)	353				(323)	357
15				(314)	373				(337)	380
16				(326)	392				(350)	402
17				(337)	411				(362)	422
18				(347)	429				(374)	442
19				(357)	445				(385)	461
20				(366)	460				(395)	480

Příloha C – Dokumentace pracoviště v laboratoři VN

V popředí napěťový dělič, za ním impulzní generátor Haefely.

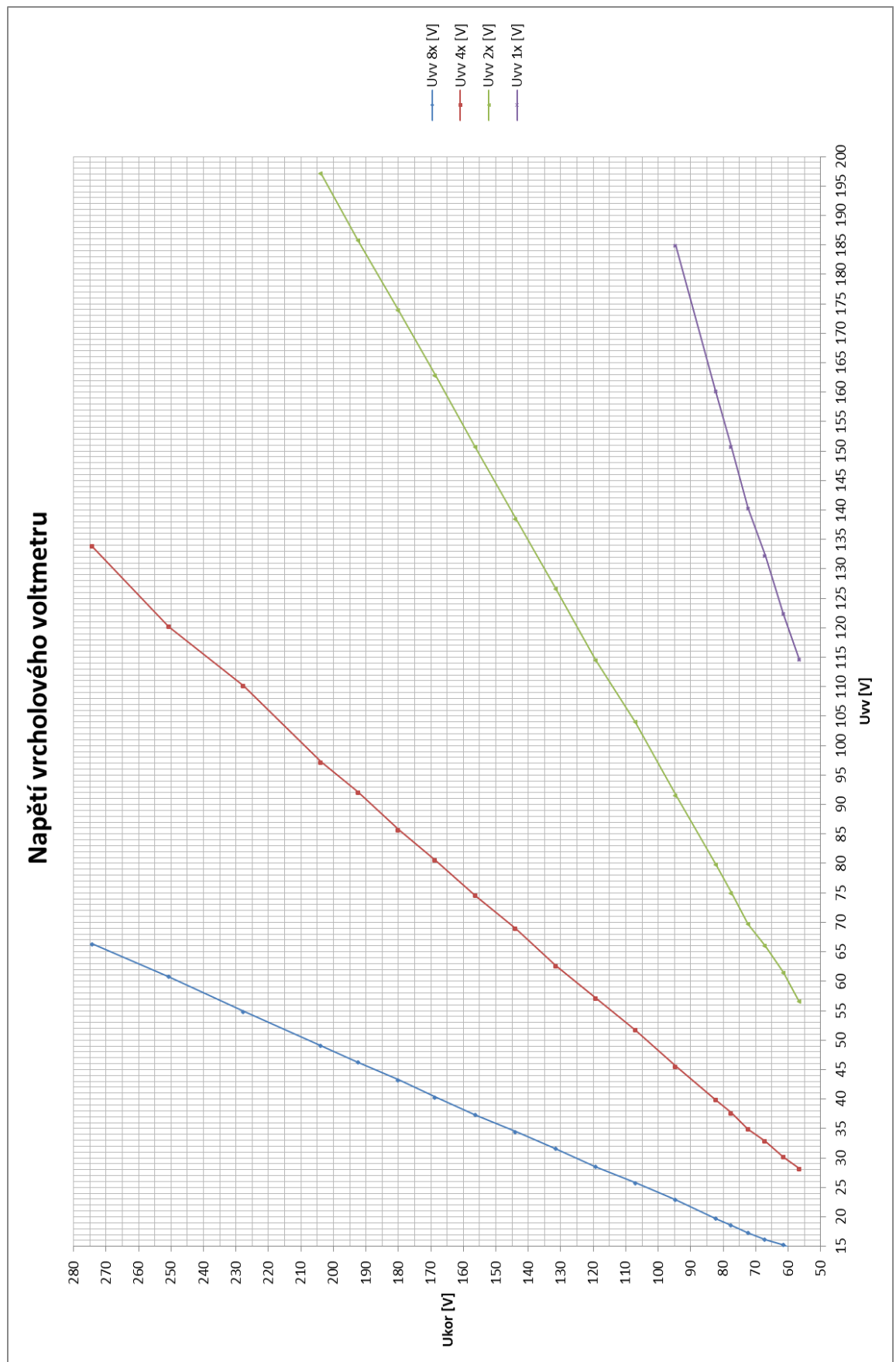


Příloha D – Tabulka naměřených hodnot

Údaje odečtené z měřících zařízení jsou zprůměrované vždy z alespoň pěti změřených hodnot.

S [mm]	t [°C]	b [kPa]	U_{tab} [kV]	U_{kor} [kV]	U_{nab} [V]	$U_{\text{w}} 8x$ [V]	$U_{\text{w}} 4x$ [V]	$U_{\text{w}} 2x$ [V]	$U_{\text{w}} 1x$ [V]
20	24,4	98,6	59,0	56,6	15,7	14,1	28,2	56,6	114,7
22	25,8	98,4	64,5	61,4	17,2	15,3	30,2	61,5	122,4
24	24,6	98,6	70,0	67,1	18,3	16,2	32,9	66,0	132,3
26	24,9	98,6	75,5	72,3	19,5	17,3	34,9	69,7	140,3
28	25,2	98,7	81,0	77,5	21,0	18,6	37,6	75,0	150,7
30	25,3	98,7	86,0	82,3	22,4	19,7	39,9	79,8	160,1
35	24,9	98,5	99,0	94,6	26,0	22,9	45,6	91,6	184,9
40	25,1	98,5	112	107,0	29,4	25,8	51,7	104,0	-
45	25,3	98,5	125	119,3	32,4	28,5	57,1	114,6	-
50	25,6	98,4	138	131,6	36,0	31,6	62,6	126,7	-
55	25,7	98,4	151	143,9	39,7	34,5	68,9	138,5	-
60	25,7	98,4	164	156,3	43,2	37,3	74,6	150,7	-
65	25,8	98,5	177	168,7	46,7	40,3	80,6	162,8	-
70	25,9	98,4	189	180,0	50,7	43,2	85,7	173,9	-
75	25,8	98,4	202	192,4	54,4	46,3	92,1	185,7	-
80	25,8	98,4	214	203,9	57,6	49,0	97,2	197,1	-
90	25,8	98,4	239	227,7	65,4	54,8	110,1	-	-
100	25,6	98,4	263	250,8	72,5	60,8	120,2	-	-
110	25,7	98,7	287	274,3	79,4	66,4	133,9	-	-

Příloha E – Kalibrační křivka pro vrcholový voltmetr



Příloha F – Kalibrační křivka pro nabíjecí napětí