

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stolní rázový generátor

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vítězslav KUČERA**
Osobní číslo: **E14N0019P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Stolní rázový generátor**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište principy a funkci rázového generátoru
2. Provedte návrh modelace tvaru výstupního napěťového impulzu pomocí odporového děliče
3. Parametrizujte návrh obvodu pro tvarování impulsu pro různé impedance zátěže
4. Prakticky ověřte návrh modelace čela, týlu a useknutého napěťového impulzu

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6
2. Mentlík, V. et al. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
3. Mentlík V., Trnka P. a kol., Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN 2011.

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na principy a funkci impulzního generátoru vysokého napětí. V teoretické části této práce jsou popsány druhy impulzního napětí, zkušební postupy, poté rázový generátor a nakonec měření vysokých napětí a velkých proudů. Praktická část se zabývá vytvořením návrhu modelace k určení tvaru výstupního napěťového impulzu pomocí odporového děliče. Dále jsou stanoveny parametry obvodu pro tvarování impulzu s kapacitní zátěží. Veškeré navržené parametry jsou následně ověřeny ve funkčních simulačních schématech v programu LTspice od společnosti Linear Technology.

Klíčová slova

Rázový generátor, atmosférické impulzní napětí, spínací impulzní napětí, doba čela, doba půltýlu, simulace.

Abstract

The master thesis is focused on the principles and functions of high voltage impulse generator. The theoretical part of this work describes the kinds of impulse voltage, test procedures, impulse generator and finally, the measurement of high voltages and large currents. The practical part deals with design modeling to determine the shape of the output voltage impulse using a resistive divider. Further the circuit parameters for impulse shaping with a capacitive load are set. Then all proposed parameters are validated in functional simulation diagrams in the LTspice program from Linear Technology company.

Key words

Impulse generator, lightning impulse voltage, switching impulse voltage, front time, time to half value, simulation.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci 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 15.5.2016

Bc. Vítězslav Kučera

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Pavlu Trnkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 IMPULZNÍ NAPĚTÍ	12
1.1 ATMOSFÉRICKÉ IMPULZNÍ NAPĚTÍ.....	13
1.1.1 <i>Plné atmosférické impulzní napětí</i>	13
1.1.2 <i>Atmosférické impulzní napětí useknuté v čele a týlu</i>	17
1.2 SPÍNACÍ IMPULZNÍ NAPĚTÍ.....	19
2 ZKUŠEBNÍ POSTUPY	21
2.1 ZKOUŠKY ATMOSFÉRICKÝM A SPÍNACÍM IMPULZNÍM NAPĚTÍM.....	21
2.1.1 <i>Zkoušky výdržným napětím</i>	21
2.1.2 <i>Zkoušky zaručeného napětí průrazného výboje</i>	23
3 RÁZOVÝ GENERÁTOR	24
3.1 PRINCIP A FUNKCE RÁZOVÉHO GENERÁTORU NAPĚTÍ.....	24
3.1.1 <i>Jednostupňový rázový generátor napětí</i>	24
3.1.2 <i>Vícestupňový rázový generátor napětí</i>	28
4 MĚŘENÍ VYSOKÝCH NAPĚTÍ A VELKÝCH PROUDŮ	30
4.1 KULOVÁ JISKŘIŠTĚ.....	30
4.1.1 <i>Obecné uspořádání jiskřiště</i>	31
4.1.2 <i>Rozsah použití kulového jiskřiště</i>	32
4.2 DĚLIČE NAPĚTÍ.....	33
4.2.1 <i>Odporový dělič</i>	34
4.2.2 <i>Kapacitní dělič</i>	35
5 NÁVRH MODELACE TVARU VÝSTUPNÍHO NAPĚŤOVÉHO IMPULZU	37
5.1 OBECNÝ POSTUP MODELACE TVARU VÝSTUPNÍHO NAPĚŤOVÉHO IMPULZU.....	37
5.1.1 <i>Určení tvaru výstupního napěťového impulzu</i>	39
5.1.2 <i>Určení konstant pro daný napěťový impulz</i>	39
5.2 VÝPOČET KONSTANT ATMOSFÉRICKÉHO NAPĚŤOVÉHO IMPULZU.....	40
5.3 SIMULACE IMPULZNÍHO GENERÁTORU NAPĚTÍ.....	42
5.3.1 <i>Šestistupňový impulzní generátor napětí modelující tvar atmosférického impulzu</i>	43
5.3.2 <i>Působení kapacitní zátěže na výstupní rázovou vlnu generátoru</i>	45
5.4 OVĚŘENÍ NÁVRHU MODELACE ČELA, TÝLU, A USEKNUTÉHO NAPĚŤOVÉHO IMPULZU POMOCÍ ODPOROVÉHO DĚLIČE.....	46
5.4.1 <i>Návrh kapacitního děliče napětí</i>	49
ZÁVĚR	51
SEZNAM LITERATURY	53
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

A [cm]	výška nad uzemněnou rovinou
B [cm]	poloměr prostoru bez cizích předmětů
D [cm].....	průměr kulových elektrod
C_1 [F]	činná kapacita
C_2 [F]	zatěžovací kapacita
C' [F]	parazitní kapacita odporového děliče
C_m [F].....	kapacita měřicího přístroje
J	jiskřiště
$k(f)$	funkce zkušebního napětí
K_1, K_2	konstanty charakteristické rovnice z počátečních podmínek
n	počet stupňů rázového generátoru
O	skutečný počátek
O_1	zdánlivý počátek
R [Ω].....	nabíjecí odpor
R_1 [Ω].....	čelní odpor
R_2 [Ω].....	týlní odpor
S	doskok na kulovém jiskřišti
t [s].....	čas
T_{AB} [s].....	doba mezi intervalem A a B
T_1 [s]	doba čela
T_2 [s]	doba půltýlu
T_c [s].....	doba do useknutí
T_d [s]	doba nad 90%
T_p [s]	doba do vrcholu
T_z [s].....	doba k nule
$u_1(t)$	napětí na kondenzátoru C_1
$u_2(t)$	napětí na kondenzátoru C_2
U_0 [V]	zdroj stejnosměrného napětí
U_1 [V]	vstupní napětí
U_2 [V]	výstupní napětí
U_{10} [V].....	10% napětí průrazného výboje

U_b [V]	maximální hodnota základní křivky pro překmit
U_e [V].....	krajní hodnota zaznamenané křivky pro překmit
U_t [V].....	hodnota zkušebního napětí pro překmit
v_n	vysoké napětí
v_{vn}	velmi vysoké napětí
z_{vn}	zvláště vysoké napětí
X	pomocný činitel
α	Angeliniho parametr pro návrh rázového generátoru
α_1, α_2	kořeny charakteristické rovnice
β [V].....	velikost překmitu
β' [%].....	relativní velikost překmitu
f [Hz].....	kmitočet
η	Angeliniho parametr pro návrh rázového generátoru
τ_1	časová konstanta
τ_2	časová konstanta
Θ [μ s].....	parametr času

Úvod

Tato předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku rázových generátorů. Rázový generátor, rovněž nazývaný také jako impulzní generátor, je zařízení, které umožňuje vytvářet požadované impulzy o značně vysokých amplitudách aperiodického tvaru. Historie rázového generátoru spadá do první poloviny 20. století, kdy Erwin Otto Marx navrhl a popsal elektrický obvod pro generování vysokonapěťových impulzů napájených z nízkonapěťového stejnosměrného zdroje. Tento elektrický obvod byl pojmenován po jeho vynálezci jako Marxův generátor a s tímto názvem se lze setkat stále doposud.

Podle charakteru výstupního impulzu je možno rázové generátory rozdělit na proudové, napěťové či kombinované (napěťové, proudové). Generované proudové a napěťové impulzy mají velmi rychlou dobu náběhu do maximální hodnoty a potom pomaleji sestupují k nule bez výrazných kmitání. Rázové generátory jsou vytvořené tak, aby napodobovaly skutečné impulzy, které jsou na elektrickém vedení způsobené úderem blesku nebo spínáním. Od toho také vyplývá rozdělení impulzů na dva druhy. Prvním z nich je atmosférický impulz napětí, který je definován normou jako $1,2/50 \mu\text{s}$, a druhým z nich je spínací impulz napětí $250/2\ 500 \mu\text{s}$.

Rázové generátory jsou používány v laboratořích vysokého napětí k simulování těchto impulzů. Impulzní vlna se získává z několika stupňů paralelně spojených kondenzátorů rázového generátoru, které se vybíjejí sériově, a tím vytváří danou vlnu o vysokých hodnotách. Touto vlnou se pak v laboratořích vysokého napětí testují zařízení a součástky spjaté s vysokým napětím, jako jsou například silové a měřicí transformátory, odpojovače, vypínače, podpěrné průchodky a podobně. Právě těmito zkouškami se určuje elektrická pevnost izolačních materiálů a zjišťuje se působení přepětí na izolaci.

Cílem této diplomové práce je navrhnout modelaci výstupního tvaru napěťového impulzu pomocí odporového děliče a stanovit parametry obvodu s kapacitní zátěží pro tvarování impulzu. Veškeré výpočty jsou dále ověřeny pomocí simulačních schémat v programu LTspice.

1 Impulzní napětí

Všechna elektrická zařízení a elektrotechnické součástky včetně těch, která jsou přirozenou součástí rozvodu a přenosu elektrické energie vysokým, velmi vysokým a zvláště vysokým napětím jako jsou závěsné izolátory, podpěrné průchodky, silové a měřicí transformátory, odpojovače, vypínače atd., jsou během provozu podrobena dvěma typům elektrického namáhání. Prvním typem je namáhání provozním napětím, kde dané zařízení a elektrotechnické součástky jsou vystaveny nepřetržitě provoznímu napětí po dobu působení tohoto napětí. Druhým typem je namáhání přepětím, které se vyznačuje vyšším napětím než je provozní napětí a trvá určitou omezenou dobu. Toto přepětí lze rozdělit dále na přepětí vnitřní a přepětí vnější. Přepětí vnitřní mají periodický tlumený charakter, naopak přepětí vnější mají charakter aperiodických jevů, které se neopakují a tvoří impuls. [1]

V době po první světové válce v prvním desetiletí se začalo zabývat otázkou jak napodobit během zkoušky stejné poměry, které vznikají v provozu při působení impulsů. To znamená vytvořit impuls napětí umělou cestou a následně ho aplikovat na zkoušky elektrických zařízení nebo na elektrotechnické součástky. Tyto zkoušky se nazývají impulzním napětím a impulzním proudem, kde postupem času se jejich počet a obor uplatnění značně rozšířil. [1]

Pod pojmem impuls si můžeme představit záměrně aplikované aperiodické přechodné napětí či proud. Doba náběhu impulsu obvykle rychle stoupá do vrcholové hodnoty a poté pomaleji sestupuje k nule bez výrazného kmitání. Impulzy rozdělujeme na atmosférické a spínací, které se od sebe odlišují rozdílnou dobou čela impulsu. Atmosférické impulzy se vymezují dobou čela do 20 μs , spínací impulzy se určují s delší dobou čela nad 20 μs . [1]

Impulzy, které se užívají při napěťových a proudových zkouškách, se produkují ve speciálních zkušebních zařízeních, tak zvaných impulzních generátorech, které jsou součástí laboratoří pro vysoká napětí. Těmito zkouškami se zjišťuje elektrická pevnost izolačních materiálů a zkoumá se působení přepětí na izolaci. [1-2]

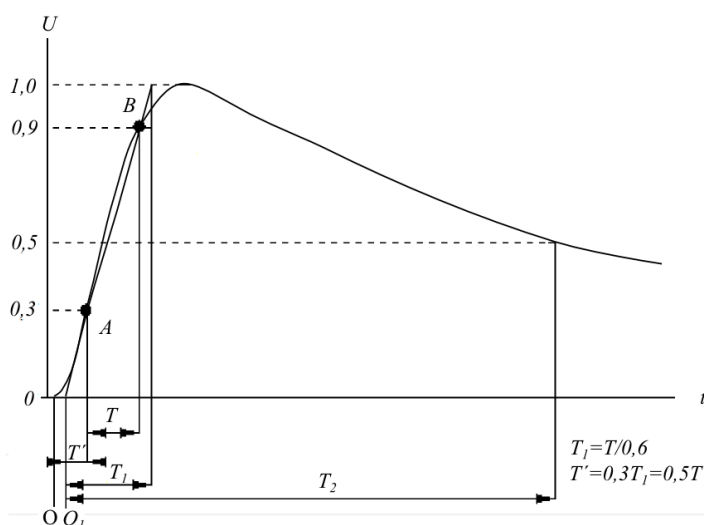
Elektrická pevnost izolace výrazně závisí na tvaru impulzu, kde tvar impulzu se podobá přepětovým vlnám, které byly určeny ze skutečných přepětí v sítích vn, vvn a zvn za pomoci oscilogramů. Tvar impulzu je během zkoušek stanoven příslušnou normou. [1]

1.1 Atmosférické impulzní napětí

Atmosférické impulzní napětí vzniká přímým úderem blesku do fáze venkovního vedení nebo přípojnic venkovních rozvodů. Amplitudy značně přesahují normální provozní napětí, kde hodnoty napětí mohou nabývat řádů až 1000 kV a více. Těmito údery jsou do přenosového vedení injektovány proudy o hodnotách až 100 kA. Každým úderem pak následuje rázová vlna, kde amplituda je omezena maximální izolační pevností vedení. [3]

1.1.1 Plné atmosférické impulzní napětí

Plné atmosférické impulzní napětí je takové napětí, při kterém není přerušena doba trvání průrazným výbojem (viz obr. 1). Rázová vlna je tvořena aperiodickým přechodným napětím s rychlým vzestupem na maximální napětí a pomalejším poklesem zpátky k nule. Doba vzestupu pro atmosférické impulzní napětí je stanovena do 20 μ s a následně doba poklesu může trvat až několik sekund. Místo, tam kde napětí narůstá, se nazývá čelo vlny a naopak místo, kde napětí klesá, se nazývá tyl vlny. Doba čela T_1 je zdánlivý parametr určený jako $1/0,6$ násobek intervalu T mezi dobami, při kterých impulz odpovídá 30 % (bod A) a 90 % (bod B) vrcholové hodnoty křivky zkušebního napětí (viz obr. 1). [4]



Obr. 1: Časové parametry plného impulzního napětí (převzato z [4])

Zdánlivý počátek O_1 atmosférického impulzu určuje dobu předcházející odpovídajícímu bodu A křivky zkušebního napětí o $0,3T_1$ (viz obr. 1). Doba půltýlu T_2 je též zdánlivý parametr definovaný jako časový interval mezi zdánlivým počátkem O_1 a dobou, při kterém křivka zkušebního napětí klesne na poloviční hodnotu zkušebního napětí (viz obr. 1). [4]

Za normalizovaný atmosférický impulz se udává hodnota 1,2/50 μs , kde doba čela trvá 1,2 μs a doba půltýlu 50 μs . Dále se akceptují následující rozdíly mezi danými hodnotami pro normalizovaný impulz a hodnotami vypočtenými z křivky zkušebního napětí [4]. Hodnoty tolerancí zahrnují:

- **Hodnota zkušebního napětí** $\pm 3 \%$
- **Doba čela** $\pm 30 \%$
- **Doba půltýlu** $\pm 20 \%$

Tyto hodnoty stanovuje norma ČSN EN 60060-1.

Značně nežádoucím stavem je překmit napětí, který způsobuje nárůst amplitudy impulzního napětí v důsledku tlumených oscilací ve vrcholu. Oscilace nabývají obvykle hodnot frekvencí v rozmezí 0,1 MHz až 2 MHz a jsou způsobeny indukčností obvodu. Mnohdy jim nelze zabránit v obvodech velkých rozměrů či u zkoušek předmětů s velkou indukčností. [4]

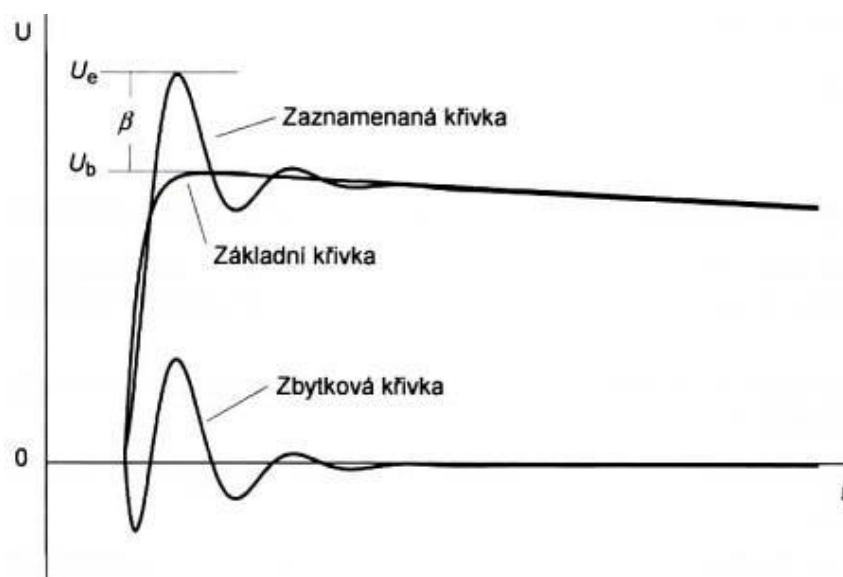
Překmit lze vyjádřit dvěma způsoby. První značí velikost překmitu a druhý relativní velikost překmitu. Velikost překmitu β určuje rozdíl mezi krajními hodnotami zaznamenané křivky U_e a maximální hodnotou základní křivky U_b (viz obr. 2). Relativní velikost překmitu β' stanovuje poměr velikosti překmitu ke krajní hodnotě a je udávána v procentech. Krajní hodnota stanovuje maximální hodnotu zaznamenané křivky od základní hladiny ve stejném smyslu jako přiložený impulz, kde základní hladina je tvořena hladinou záznamu impulzní měřicí soustavou, při které je vstupní záznam nulový. Pokud příslušná technická komise nestanoví jinak, je relativní velikost překmitu $\beta' \leq 10 \%$. [4]

Velikost překmitu β je dána vzorcem:

$$\beta = U_e - U_b [V] \quad 1.1$$

Relativní velikost překmitu β' je dána vzorcem:

$$\beta' = \frac{U_e - U_b}{U_e} \cdot 100 [\%] \quad 1.2$$



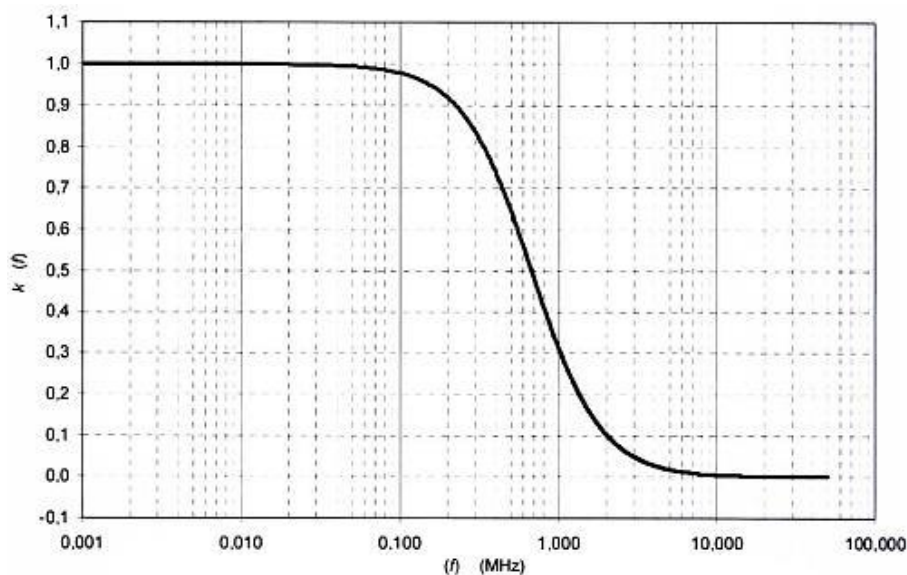
Obr. 2: Časový průběh zaznamenané a základní křivky s ukázkou překmitu a zbytkové křivky (převzato z [4])

Zaznamenaná křivka tvoří skutečný časový průběh impulzního atmosférického napětí s obsahem superponovaných oscilací a je znázorněna pomocí grafického nebo číslicového zobrazení zkušebních dat impulzního napětí. Základní křivka představuje normou stanovený teoretický impuls, který lze nazvat jako odhad plného atmosférického impulzního napětí bez superponovaných oscilací. Zbytková křivka (viz obr. 2) je rozdíl mezi zaznamenanou křivkou a základní křivkou. [4]

Pro omezení těchto překmitů lze využít funkci zkušebního napětí $k(f)$ (viz obr. 3), která je funkcí amplitudově kmitočtovou a je určena k reprezentaci odezvy izolace na impulsy s překmitem. Tato funkce je dána vztahem (1.3): [4]

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2 \cdot f^2} \quad (1.3)$$

kde f je kmitočet v MHz.



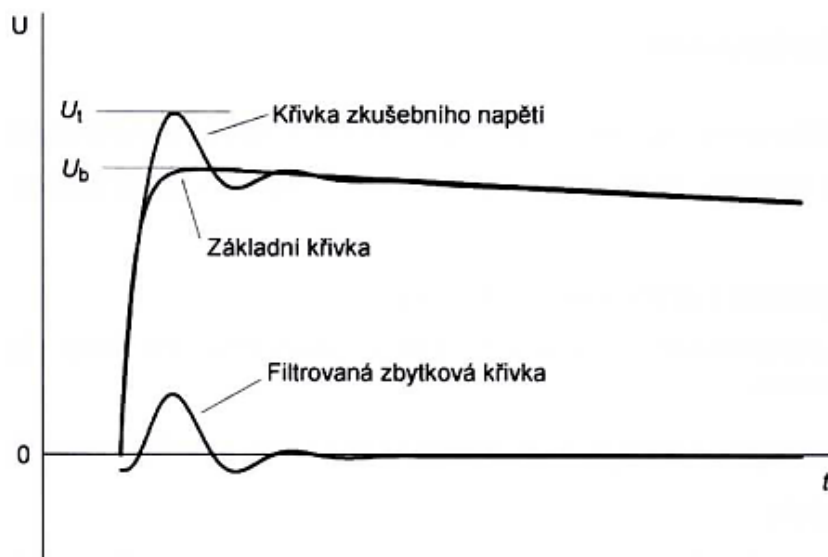
Obr. 3: Funkce zkušební napětí jako funkce kmitočtu (převzato z [4])

Bude-li aplikována tato funkce jako filtr na zbytkovou napěťovou křivku (viz obr. 2), bude tím umožněn výpočet hodnoty zkušební napětí U_t (viz rovnice 1.4) ekvivalentního plnému atmosférickému impulzu napětí. [4]

$$U_t = U_b + k(f) \cdot (U_e - U_b) [V] \quad 1.4$$

Zkušební napětí U_t je založeno na empirické rovnici (viz rovnice 1.4), kterému je izolace vystavena v průběhu atmosférického impulzního napětí s velikostí překmitu β . Dále také určuje maximální hodnotu křivky zkušební napětí měřené od základní hladiny stejným způsobem jako aplikovaný impulz. [4]

Na obrázku 4 a 5 lze vidět filtrovanou zbytkovou křivku pomocí funkce zkušební napětí U_t . Dále je zde znázorněna křivka zkušební napětí, která je dána součtem základní křivky a filtrované zbytkové křivky. [4]



Obr. 4: Časový průběh křivky zkušebního napětí - součtu základní křivky a filtrované zbytkové křivky (převzato z [4])

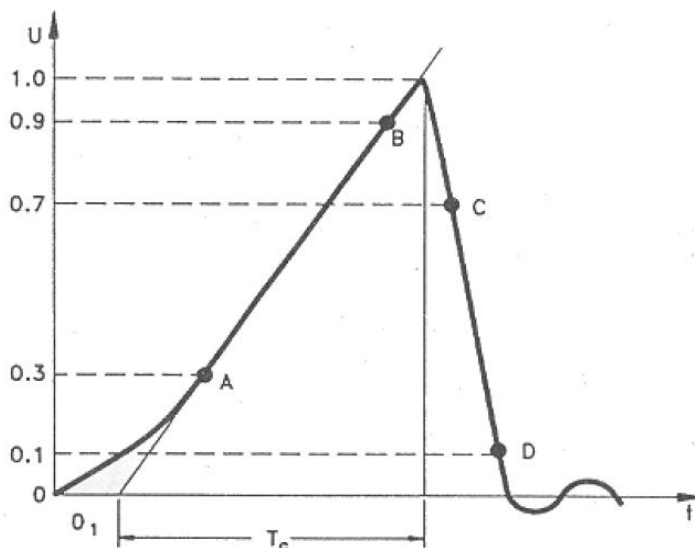


Obr. 5: Časový průběh zaznamenané křivky a křivky zkušebního napětí (převzato z [4])

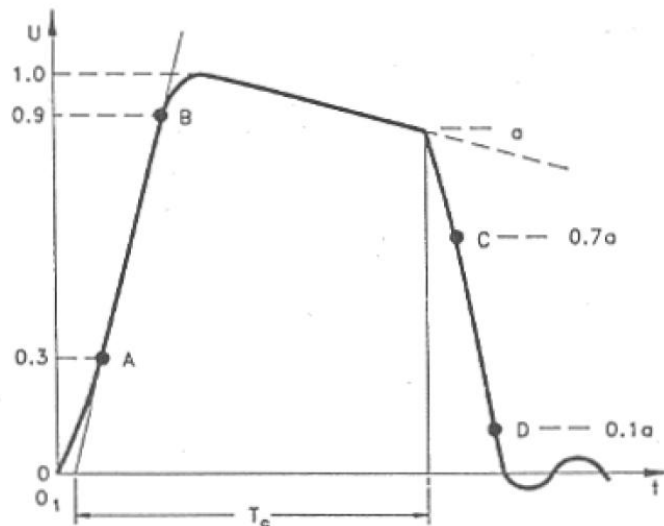
1.1.2 Atmosférické impulzní napětí useknuté v čele a týlu

Atmosférické useknuté impulzní napětí je takové napětí, při kterém dojde během jeho doby trvání k poklesu napětí skoro na nulovou hodnotu s oscilacemi, případně bez nich (viz obr. 6 a 7). Useknutí je způsobeno průrazným výbojem vnitřní či vnější izolace zkoušeného objektu nebo na vnějším usekávacím jiskřišti. Pokles napětí v důsledku useknutí může nastat v čele, vrcholu a týlu impulzu. Okamžikem useknutí se rozumí doba, kdy poprvé nastane rychlý pokles napětí k nule. Tento pokles je definován body C a D reprezentující 70 % a 30 % průběh napětí při useknutí (viz obr. 6 a 7). Doba trvání poklesu

napětí je určena jako $1/0,6$ násobek časového intervalu mezi body C a D. Zdánlivým parametrem se označuje doba do useknutí T_c , která je definovaná jako časový interval mezi zdánlivým počátkem O_1 a okamžikem useknutí. [4]



Obr. 6: Atmosférické impulzní napětí useknuté v čele (převzato z [4])

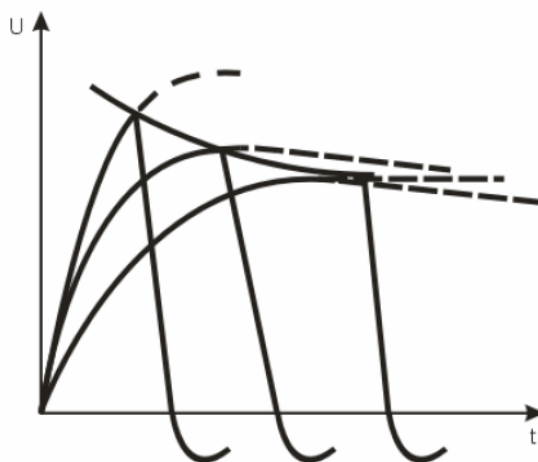


Obr. 7: Atmosférické impulzní napětí useknuté v týlu (převzato z [4])

Normalizovaný useknutý atmosférický impulz napětí je normalizovaný impulz useknutý vnějším jiskřištěm s dobou trvání po $2 \mu\text{s}$ až $5 \mu\text{s}$. Jinou dobu useknutí může určit příslušná technická komise. [4]

Pro lineárně rostoucí impulzní napětí je voltsekundová charakteristika znázorněna jako křivka, která vyjadřuje vztah závislosti vybíjecího napětí na době čela T_1 . Křivka se získá pomocí přikládáním impulzních napětí rozdílné strmosti. [1,4]

Voltsekundová charakteristika pro impulzy s konstantním předpokládaným tvarem je křivka znázorňující vztah závislosti napětí průrazného (přeskokového) výboje testovaného předmětu k době do useknutí (přeskoku resp. průrazu). To může nastat v čele, ve vrcholu či v týlu impulzu. Získání křivky se docílí přikládáním impulzního napětí s odlišnou předpokládanou maximální hodnotou (viz obr. 8). [1,4]



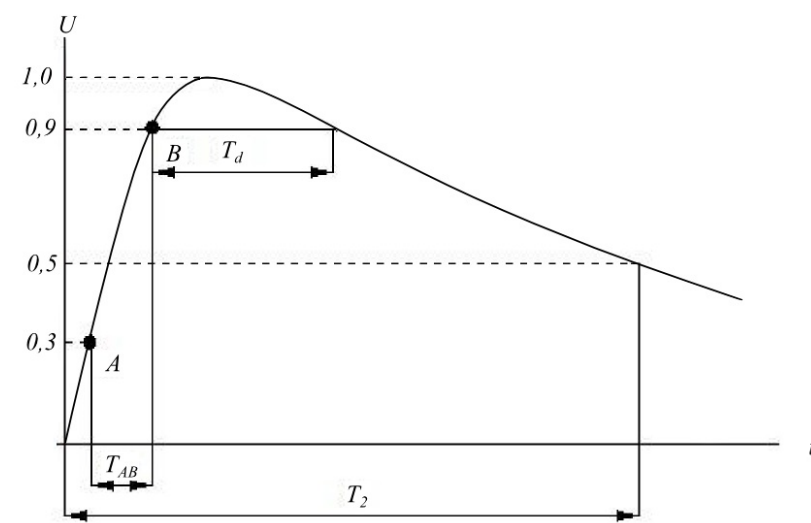
Obr. 8: Voltsekundová charakteristika pro impulzy konstantního předpokládaného tvaru (převzato z [4])

1.2 Spínací impulzní napětí

Spínací impulzní napětí se od atmosférického impulzního napětí odlišuje dobou trvání čela, která je delší než $20 \mu\text{s}$. Hodnota zkušební napětí znázorňuje maximální hodnotu, jestliže příslušná technická komise nestanoví tuto hodnotu jinak. Doba do vrcholu se značí T_p a definuje časový interval od skutečného počátku do doby, kdy spínací impulzní napětí dosáhne své maximální hodnoty (viz obr. 9). Skutečný počátek O znázorňuje okamžik zaznamenané křivky, jež se začne navyšovat (či snižovat). Doba půltýlu spínacího impulzu T_2 zobrazuje časový interval mezi skutečným počátkem a okamžikem, kdy dojde k jeho prvnímu poklesu na poloviční hodnotu z maximální hodnoty. Dalším parametrem je doba nad 90 % označována jako T_d , která určuje časový interval, při kterém spínací impulzní napětí převyšuje hodnotu 90 % jeho vrcholové hodnoty. Poslední hodnota T_z nazývána

jako doba k nule vymezuje časový interval mezi skutečným počátkem a okamžikem, kdy napětí projde poprvé nulovou hodnotou. [4]

Pro stanovení doby nad 90 % a doby k nule místo doby půltýlu se tato doba určuje za podmínek, kdy tvar impulsu jeví známky nasycení během zkoušeného předmětu nebo na zkušebním obvodu nebo dokonce i tam, kde tvrdost zkoušky důležité části vnitřní izolace zkoušeného předmětu se pokládá za silně závislou na těchto daných parametrech. Obecně je k dispozici pro určení spínacího impulsu napětí definována sada časových parametrů vztahující se ke tvaru vlny. Tyto časové parametry jsou přesně definovány referenčními hodnotami. Například hodnoty pro impuls T_p/T_2 nebo $T_p/T_d/T_z$. V případě neobvyklých zkoušek může příslušná technická komise jednotlivé parametry dodatečně upřesnit. [4]



Obr. 9: Spínací impulzní napětí (převzato z [4])

Za zkušební napětí pro normalizované spínací impulsy se považuje hodnota impulsu 250/2 500 μ s, která je popsána normou ČSN EN 60060-1, kde hodnota 250 μ s představuje dobu do vrcholu T_p a hodnota 2 500 μ s dobu půltýlu T_2 . Norma také povoluje následné tolerance mezi hodnotami určenými a skutečné naměřenými pro normalizované i zvláštní impulsy. Pokud není stanoveno příslušnou komisí jinak, jsou tyto hodnoty tolerancí: [4]

- **Hodnota zkušebního napětí** $\pm 3 \%$
- **Doba do vrcholu** $\pm 20 \%$
- **Doba půltýlu** $\pm 60 \%$

2 Zkušební postupy

V laboratořích vysokého napětí se lze setkat se zkouškami a zkušebními postupy, které jsou aplikovány na zařízení a součástky určené pro vysoká napětí. Těmito zkouškami a zkušebními postupy se potom určuje elektrická pevnost izolačních materiálů a zjišťuje se působení přepětí na izolaci.

Zkušební postupy lze popsat několika metodami, které stanovuje česká technická norma ČSN EN 60060-1 s názvem: „*Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*“.

2.1 Zkoušky atmosférickým a spínacím impulzním napětím

U těchto zkoušek se generované zkušební napětí získává pomocí impulzního generátoru. Atmosférický impulz je vyznačován s dobou trvání čela do 20 μs , naopak impulz s delší dobou trvání se nazývá spínací. Normalizovaná hodnota atmosférického impulzu je 1,2/50 μs a její tolerance jsou popsány výše (viz podkapitola 1.1.1). Pro normalizovaný spínací impulz se udává hodnota 250/2 500 μs a její tolerance jsou popsány v podkapitole 1.2. [4]

2.1.1 Zkoušky výdržným napětím

Zkušební postup závisí na charakteru izolace zkoušeného objektu. Zkoušený objekt může být tvořen dvěma izolacemi, izolací samočinně obnovující se a samočinně neobnovující se. Samočinně obnovující se izolace dokáže obnovit zcela své izolační vlastnosti po vzniku průrazného výboje, který byl vyvolán přiložením zkušebního napětí. U samočinně neobnovující se izolace po vzniku průrazného výboje, jenž byl vyvolán přiložením zkušebního napětí, se izolace zcela neobnovuje nebo ztrácí své izolační vlastnosti. Ve vysokonapěťových přístrojích lze nalézt části s kombinací izolace obojího typu. U některých částí může dojít k degradaci izolace, pokud přiložené napětí bude opakovaného či trvalého charakteru. Toto chování izolace v tomto významu je nutno brát v úvahu příslušnou technickou komisí, která stanovuje zkušební postupy pro zkoušky. [4-5]

- **Zkoušky výdržným napětím: postup A**

Zkoušený objekt je testován pomocí tří impulzů. Tyto impulzy jsou přikládány na zkoušený objekt a mají určený tvar a polaritu na hladině stanoveného výdržného napětí. Nedojde-li k poruše zkoušeného objektu, jsou požadavky zkoušky splněny. Postup zjištění poruchy zkoušeného objektu stanovuje příslušná technická komise. Tento postup zkoušky výdržným napětím je vhodný pro zkoušky degradovatelného typu nebo pro zkoušky samočinně neobnovující se izolace. [4]

- **Zkoušky výdržným napětím: postup B**

U této zkoušky se na zkoušený objekt přikládá patnáct impulzů, které mají charakter daného tvaru a polaritu na hladině stanoveného výdržného napětí. Požadavky zkoušky jsou splněny, pokud nedojde k více než dvěma průrazným výbojům v místě samočinně se obnovující izolace a není-li zjištěna porucha v místě samočinně se neobnovující izolace. Jako upozornění, že nedošlo k poruše v samočinně se neobnovující izolaci, jsou poslední tři impulzy, které nezpůsobily průrazný výboj. Pokud by nastal jeden průrazný výboj mezi třináctým až patnáctým impulzem, přiloží se následující tři impulzy. Jestliže se v těchto přidaných impulzech neobjeví žádný další průrazný výboj, lze zkoušku brát za úspěšnou. [4]

- **Zkoušky výdržným napětím: postup C**

Tak jako u zkoušky výdržným napětím s postupem A, se i tady na zkoušený objekt přikládají tři impulzy určeného tvaru a polaritu na stanovené hladině výdržného napětí. Jestliže zkoušený objekt obstál v této zkoušce, nedojde k průraznému výboji. Pokud nastane stav, kdy dojde k více než k jednomu průraznému výboji, zkoušený objekt při zkoušce neobstál. Dojde-li v místě se samočinně obnovující se izolací k jednomu průraznému výboji, přiloží se ke zkoušenému objektu dalších devět impulzů, při kterých nesmí dojít k průraznému výboji, aby zkoušený objekt mohl obstát a zkouška se stala vyhovující. Jestliže se zjistí v průběhu jakékoliv části zkoušky porucha v místě samočinně se neobnovující izolace, zkoušený objekt během zkoušky neobstál. [4]

- **Zkoušky výdržným napětím: postup D**

U zkoušky výdržným napětím s postupem D se pro testování používá několik napěťových hladin. Naopak u postupů A, B a C se na zkoušený objekt přikládá napětí,

u kterého se stanovuje pouze jeho výdržná hodnota. U zkoušky výdržným napětím s postupem D pomocí statistických zkušebních postupů je možno vyhodnotit 10% napětí průrazného výboje U_{10} v případě samočinně obnovující se izolace. Příslušná technická komise určuje hodnotu směrodatné odchylky pro napětí průrazného výboje. Je-li hodnota napětí U_{10} zkoušeného objektu větší než stanovené výdržné napětí, lze zkoušku pokládat za úspěšnou. [4]

2.1.2 Zkoušky zaručeného napětí průrazného výboje

Zkoušky zaručeného napětí průrazného výboje a jejich postupy jsou podobné zkouškám, které jsou popsány v podkapitole 2.1.1, a mohou se lišit náležitými změnami mezi výbojem a výdržnými podmínkami. Použitím odlišných metod pro konkrétní zkoušené objekty může také stanovit příslušná technická komise. [4]

3 Rázový generátor

Rázový generátor je elektrické zařízení, které umožňuje vytvářet požadované impulzy o značně vysokých amplitudách aperiodického tvaru. Jeho historie sahá až do roku 1924, kdy Erwin Otto Marx navrhl a popsal elektrický obvod pro generování impulzů vysokého napětí napájeného z nízkonapěťového stejnosměrného zdroje. Pro tento elektrický obvod vznikl název Marxův generátor. [6]

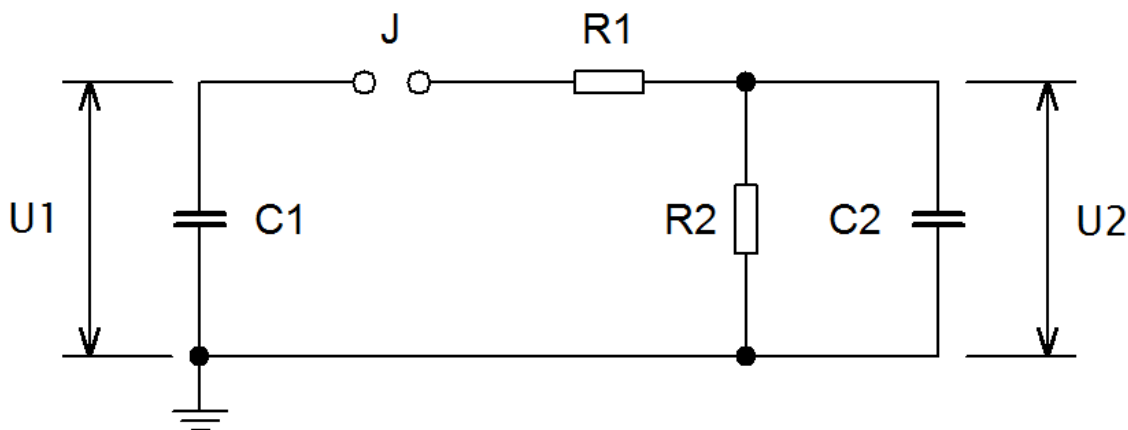
Rázové generátory je možno rozdělit pro napěťové, proudové nebo kombinované (napěťové, proudové) impulzy. Generované napěťové a proudové impulzy slouží ke zkoušení elektrotechnických součástí a přístrojů a pro různé technické aplikace jako jsou lasery, termonukleární fúze či plazmové přístroje. [1,7]

3.1 Princip a funkce rázového generátoru napětí

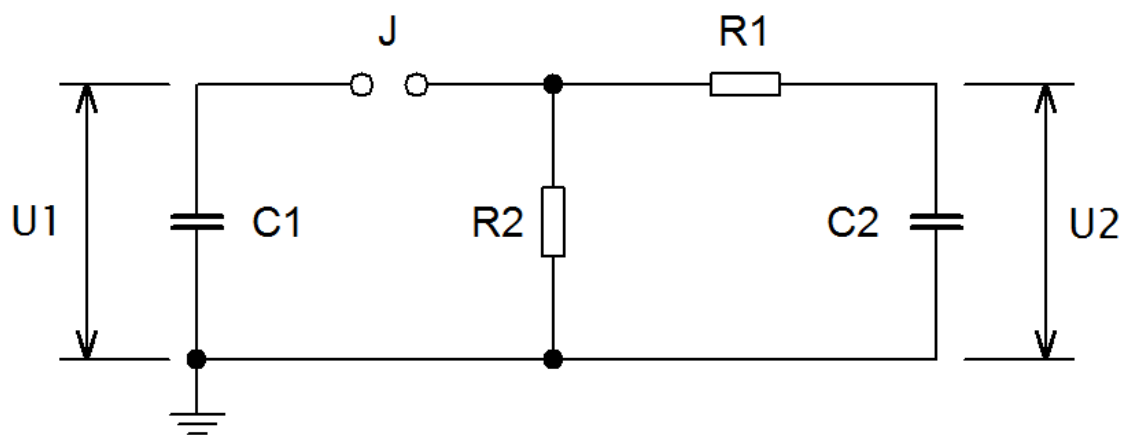
Rázové generátory napětí se používají v laboratořích vysokého napětí k simulaci atmosférických a spínacích jevů pro zkoušení odolnosti izolace, transformátorů, elektrických přístrojů a vedení. Další možné využití je pro studium výbojů vysokého napětí, ke zjišťování ochranného působení zemnicích lan a pro určení rázových charakteristik. Tento zdroj impulzního napětí lze rozdělit na dva typy, a to na jednostupňový a vícestupňový rázový generátor. [2]

3.1.1 Jednostupňový rázový generátor napětí

Jedná se o generátor, kde jeho výstupní zkušební napětí je omezeno velikostí použitého vstupního nabíjecího zdroje napětí. Základní obecné schéma pro různá zapojení jsou zobrazeny na obrázcích 10 a 11. Jednotlivé prvky ve schématech jsou znázorněny kondenzátorem C_1 , který představuje činnou kapacitu, C_2 zatěžovací kapacitu, rezistor R_1 čelní odpor a R_2 týlní odpor. Obvod je napájen stejnosměrným zdrojem napětí U_1 , který nabíjí kondenzátor C_1 . Po nabití kondenzátoru C_1 se jeho energie vybijí přes jiskřiště J do obvodu s prvky R_1 , R_2 , a C_2 , kde dané odpory vytvoří požadovaný tvar impulzu a zároveň se přes tyto odpory nabije zatěžovací kapacita C_2 . Odpor R_1 modeluje čelo impulzu a R_2 týl impulzu. [2]



Obr. 10: Schéma jednostupňového rázového generátoru [2]



Obr. 11: Schéma jednostupňového rázového generátoru (případné další zapojení) [2]

Pro výpočet výstupního napětí jednostupňového rázového generátoru jsou stanoveny průběhy napětí $u_1(t)$ na kondenzátoru C_1 a $u_2(t)$ na kondenzátoru C_2 ze základního obecného schéma (viz obr. 10). [1] Následný celý postup výpočtu je citován z [1].

Podle 1. Kirchhofova zákona platí:

$$-C_1 \frac{du_1(t)}{dt} = \frac{u_2(t)}{R_2} + C_2 \frac{du_2(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Pomocí napětí $u_1(t)$ stanovíme proud $i_{R1}(t)$ tekoucí odporem R_1 :

$$i_{R1}(t) = -C_1 \frac{du_1(t)}{dt} \quad (3.2)$$

Podle 2. Kirchhofova zákona platí:

$$u_1(t) = R_1 i_{R1}(t) + u_2(t) \quad (3.3)$$

Dosazením proudu $i_{R1}(t)$ z rovnice (3.2) do (3.3) získáme rovnici ve tvaru:

$$u_1(t) = -R_1 C_1 \frac{du_1(t)}{dt} + u_2(t) \quad (3.4)$$

Rovnice (3.4) a (3.1) derivujeme podle času a získáme:

$$\frac{du_1(t)}{dt} = -R_1 C_1 \frac{d^2 u_1(t)}{dt^2} + \frac{du_2(t)}{dt} \quad (3.5)$$

$$-C_1 \frac{d^2 u_1(t)}{dt^2} = \frac{1}{R_2} \frac{du_2(t)}{dt} + C_2 \frac{d^2 u_2(t)}{dt^2} \quad (3.6)$$

Napětí $u_1(t)$ první derivace z rovnice (3.1) a druhé derivace z (3.6) dosadíme do rovnice (3.5). Po úpravách obdržíme homogenní diferenciální rovnici 2. řádu s konstantními koeficienty pro napětí $u_2(t)$:

$$\frac{d^2 u_2(t)}{dt^2} + \frac{R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2}{R_1 C_2} \frac{du_2(t)}{dt} + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2} u_2(t) = 0 \quad (3.7)$$

Vyřešením (3.7) získáme rovnici, kde K_1 a K_2 jsou konstanty vyplývající z počátečních podmínek a α_1 , α_2 jsou kořeny charakteristické rovnice:

$$u_2(t) = K_1 e^{\alpha_1 t} + K_2 e^{\alpha_2 t} \quad (3.8)$$

Z toho kořeny charakteristické rovnice:

$$\alpha^2 + \frac{R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2}{R_1 C_2} \alpha + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2} = 0 \quad (3.9)$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{-(R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2) \mp \sqrt{(R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2)^2 - 4R_1 C_1 R_2 C_2}}{2R_1 C_1 R_2 C_2} \quad (3.10)$$

Konstanty K_1 a K_2 můžeme určit z počátečních podmínek, kde U_1 představuje napětí na kondenzátoru C_1 na počátku výboje:

$$u_2(0) = 0 \quad (3.11)$$

$$C_2 \left. \frac{du_2(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{U_1}{R_1} \quad (3.12)$$

Vyjádřením konstant K_1 , K_2 a následným dosazením do rovnice (3.8) získáme konečný tvar výstupního napětí na zatěžovací kapacitě C_1 :

$$u_2(t) = U_1 k (e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}) \quad (3.13)$$

Kde k představuje:

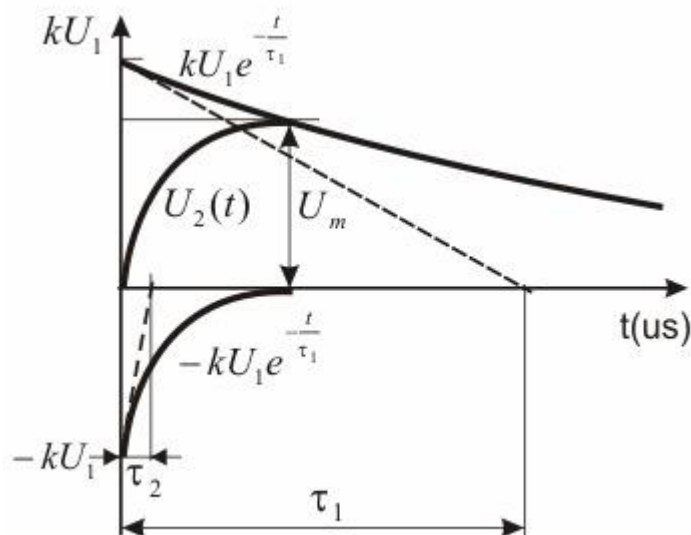
$$k = \frac{R_2 C_1}{\sqrt{(R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2)^2 - 4R_1 C_1 R_2 C_2}} \quad (3.14)$$

Výstupní napětí $u_2(t)$ je možno přepsat do tvaru:

$$u_2(t) = U_1 k (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (3.15)$$

Výsledný tvar výstupního napětí obsahuje časové konstanty τ_1 a τ_2 , které jsou závislé na parametrech prvků rázového generátoru R_1 , R_2 , C_1 a C_2 , a jejich hodnoty určují výstupní tvar napěťového impulsu, kde platí $C_1 > C_2$ a $R_2 > R_1$. [1]

Časový průběh výstupního napětí můžeme vyjádřit pomocí časových konstant τ_1 a τ_2 jako rozdíl dvou exponenciálních funkcí (viz obr. 12). [1]



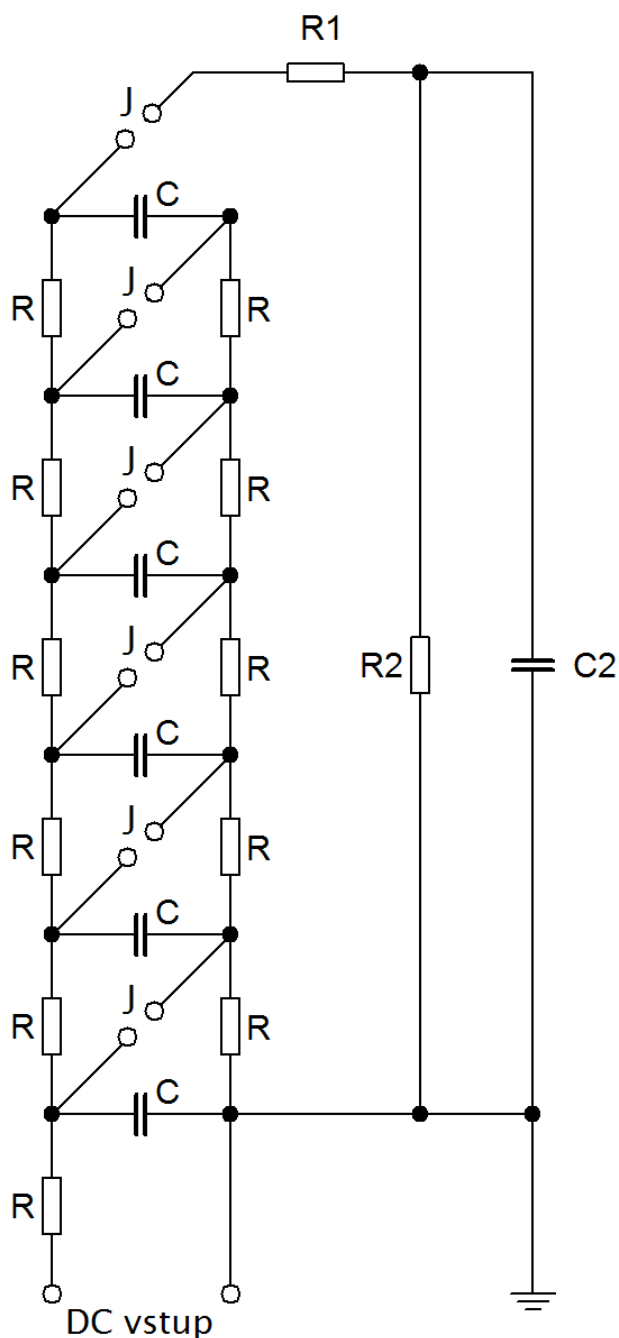
Obr. 12: Časový průběh výstupního rázového napětí (převzato z [1])

Jednostupňové rázové generátory napětí jsou omezeny svojí maximální hodnotou výstupního napětí, která činí 300 kV. V běžné praxi se však setkáváme se zařízeními, která jsou vystavena vlivům vnějšího přepětí, a k jejich zkouškám je zapotřebí značně vyšší zkušební napětí. Pro vyšší zkušební napětí je používáno zapojení s více stupni do série. Tím vznikne vícestupňový rázový generátor napětí. [1]

3.1.2 Vícestupňový rázový generátor napětí

Vícestupňový rázový generátor napětí se skládá z několika stupňů obsahujících kondenzátory C zapojené do série, které jsou nabíjeny paralelně přes nabíjecí rezistory R stejnosměrným napětím U . Tyto rezistory mají mnohem větší velikost odporu než je velikost odporu čelního a týlního rezistoru, a jejich působením nedochází ke znatelným vlivům na tvar rázové vlny. Po nabití kondenzátorů dojde k jejich vybití přes jednotlivá jiskřiště, která jsou řazena do série společně s kondenzátory, a tím se napětí na kondenzátorech sečtou na výsledné výstupní napětí. Vybíjecí proces začíná zapálením výboje v prvním řadicím jiskřišti, tzv. spouštěcím jiskřišti, na které se přivede zapalovací impuls do přidavné pomocné elektrody (tzv. trigatron). Výboj na prvním stupni spojí kondenzátor s kondenzátorem druhého stupně do série a na druhém jiskřišti dojde k výboji vlivem přepětí. Takto se nakonec postupně zapálí zbylé jiskřiště. Jestliže vybíjení kondenzátorů bude trvat velmi krátký čas, lze sériové řazení považovat za jedinou výslednou činnou kapacitu o velikosti $C_1 = \frac{C}{n}$ [2]. Velikost této kapacity by měla být nejméně pětkrát větší než zatěžovací kapacita zkoušeného předmětu C_2 . Dále tato kapacita

zahrnuje i kapacity vedlejší, které jsou způsobené konstrukcí rázového generátoru, jednotlivými jeho stupni proti zemi, kapacitou vedení, rezistorů, měřicího jiskřiště a kapacitou děliče napětí pro osciloskop. Obecné schéma pro vícestupňový rázový generátor je znázorněno na obrázku 13. Toto schéma může být zjednodušeno na obvod jednostupňového rázového generátoru podle obrázku 10, a jeho celkové parametry lze vyjádřit pomocí vzorců z kapitoly 5. [2]



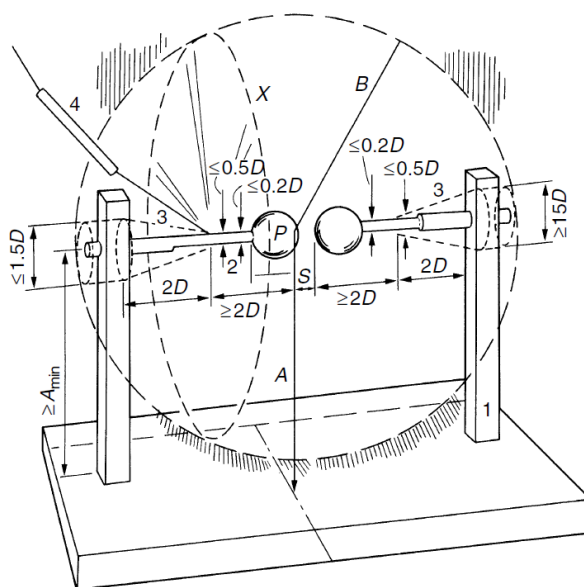
Obr. 13: Obecné schéma šestistupňového rázového generátoru napětí [3]

4 Měření vysokých napětí a velkých proudů

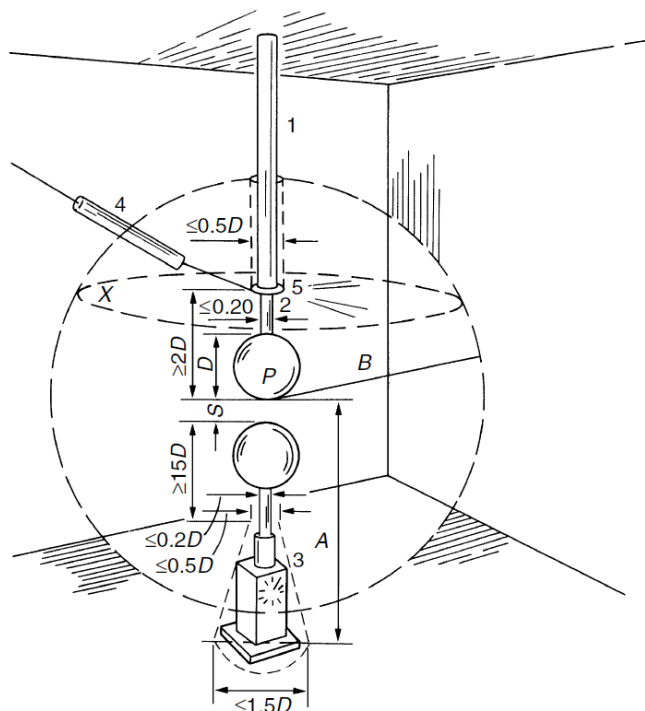
V laboratořích vysokého napětí při měření a zkoušení elektrotechnických zařízení se klade ohled především na bezpečnost. Dále jsou kladeny požadavky na přesnost měření a také na to, aby zkušební obvod nijak nezatěžoval zdroj napětí nebo neovlivňoval průběh samotné měřené veličiny. Hodnoty získávané měřením jsou střední, efektivní a vrcholové pro stejnosměrná, střídavá a impulzní napětí. [1]

4.1 Kulová jiskřiště

Kulová jiskřiště jsou jednoduchá a spolehlivá zařízení, která lze použít pro měření vrcholové hodnoty vysokých a zvláště vysokých střídavých, stejnosměrných a impulzních napětí. Dále tato zařízení lze také použít pro cejchování přístrojů a zařízení měřících napětí. Kulová jiskřiště se skládají ze dvou kulových elektrod o stejném průměru D , které jsou od sebe odděleny mezerou se vzduchovou izolací. Jmenovité průměry kulových elektrod jsou: 2; 5; 6,25; 10; 12,5; 15; 25; 50; 75; 100; 150 a 200 cm dle [1]. Povrch těchto elektrod musí být zcela hladký, čistý a suchý, ale neměl by být leštěný či lakovaný. Měřicí kulová jiskřiště nedávají přímo měřenou hodnotu, ale na základě vzdálenosti elektrod při přeskoku a s ohledem na atmosférické podmínky se tato hodnota určuje. Dle provedení se rozlišují jiskřiště s vodorovným uspořádáním (viz obr. 14) a jiskřiště se svislým uspořádáním (viz obr. 15). [1]



Obr. 14: Vodorovné kulové jiskřiště (převzato z [1])



Obr. 15: Svislé kulové jiskřiště (převzato z [1])

Pro znázorněné obrázky 14 a 15 platí tato označení dle [1]:

1 - izolující držák, 2 - dřík koule, 3 - ovládací zařízení, 4 - přívod vysokého napětí s předřadným rezistorem, 5 - stínicí elektroda (svislé jiskřiště), P - bod doskoku na kulové elektrodě s vysokým napětím, A - výška bodu P nad uzemněnou rovinou, B - poloměr prostoru, ve kterém nesmějí být cizí předměty, X - část 4 nesmí procházet touto rovinou ve vzdálenosti menší než B do bodu P .

4.1.1 Obecné uspořádání jiskřiště

Na obrázcích 14 a 15 lze názorně vidět celkové uspořádání jiskřišť. Dřík kulových elektrod má být pokud možno ve tvaru kruhového průřezu a nesmí na sobě vykazovat žádné ostré hrany nebo hroty. Velikost průměru dříku nemá být větší než $0,2D$ v délce D od kulových elektrod. Pro oba druhy kulových elektrod musí dřík do těchto elektrod vstupovat souose bez jakéhokoliv zesílení. Velikost otvoru kulové elektrody může být až o 10 % větší než průměr dříku, nejvýše však $0,2D$. Kovové části, které mění velikost průměru dříku, jako jsou stínidla, vodička, držáky, závěsy apod., mají být ve vzdálenosti minimálně $2D$ od místa bodu doskoku neuzemněné kulové elektrody. [1]

Kulová jiskřiště se používají nad uzemněnou rovinou. Výška bodu doskoku A neuzemněného kulového jiskřiště nad uzemněnou rovinou má být ve stanovených mezích, které jsou uvedeny v tabulce 1. Vzdálenosti od bodu doskoku neuzemněných kulových elektrod k jinému cizímu předmětu uzemněného či neuzemněného, stejně jako i k nosné konstrukci kulového jiskřiště nesmí být menší než hodnota B (viz. Tab. 1). Zásadně však tato vzdálenost nemá dosahovat hodnot menších než $2D$, při jakémkoliv doskoku S . Menší vzdálenosti B lze dosáhnout zhotovením nosné konstrukce jiskřiště z čistých a suchých izolantů. Hodnota B avšak nesmí být menší než $1,6D$. [1]

Tab. 1: Parametry kulových jiskřišť [1]

Průměr kulových elektrod D [cm]	Nejmenší hodnota A	Největší hodnota A	Nejmenší hodnota B
6,25	$7D$	$9D$	$14S$
12,5	$6D$	$8D$	$12S$
25	$5D$	$7D$	$10S$
50	$4D$	$6D$	$8S$
75	$4D$	$6D$	$8S$
100	$3,5D$	$5D$	$7S$
150	$3D$	$4D$	$6S$
200	$3D$	$4D$	$6S$

Na obrázku 15 u vertikálního uspořádání jiskřiště je horní kulová elektroda zavěšena na izolujícím úchytu. Protilehlá spodní kulová elektroda je vertikálně posuvná a uzemněná. Tímto uspořádáním lze pak měřit napětí na kulových jiskřištích proti zemi. Při horizontálním uspořádání (viz obr. 14) jsou kulové elektrody připevněny na izolačních podpěrách, kde jedna z nich ovládá funkci posuvu. Kulovým jiskřištěm lze potom měřit i souměrná napětí proti zemi. Posuv kulového jiskřiště je obvykle zajištěn motorickým pohonem a ukazatel doskoku je odvozen od posuvného zařízení. Při měření doskoku S je dodržena přesnost minimálně 0,2 %. [1]

4.1.2 Rozsah použití kulového jiskřiště

Kulové jiskřiště lze použít pro měření střídavého a impulzního napětí s přesností na určitou jejich vzdálenost. Tato vzdálenost odpovídá doskoku S v rozmezí od $0,05D$ do $0,5D$. Při doskocích větších vzdáleností jak $0,5D$, ale rovněž menších než $0,75D$ a při doskocích menších než $0,05D$ dochází u kulového jiskřiště při měření ke zhoršení přesnosti. Při měření stejnosměrných napětí při doskocích ve vzdálenosti do $0,4D$ lze v bezprašném prostředí měřit se zaručenou přesností. Stanovením minimální vzdálenosti

doskoku na $0,05D$ se na kulových jiskřistiších odstraňují chyby, které vznikají při obtížném měření a nastavováním doskoku při menších velikostech. [1]

Přesnost měření je u střídavých a impulzních napětí určena na $\pm 3 \%$ a u stejnosměrného napětí $\pm 5 \%$. Během měření při výboji mezi kulovými elektrodami dochází vlivem elektrostatického působení k odlišnosti jednotlivých naměřených hodnot. Z této příčiny je pro dosažení výše zmíněné přesnosti potřeba každé měření několikrát opakovat. Správná hodnota je potom určena jako aritmetický průměr tří po sobě jdoucích hodnot, které se liší o méně než 3% v jejich krajních hodnotách. [1]

4.2 Děliče napětí

Za děliče napětí jsou všeobecně považovány prvky vysokonapěťové techniky, kde hlavní funkcí je snižování napětí u vysokonapěťových zdrojů za účelem měření jejich napětí. Použití těchto děličů lze nalézt všude tam, kde už není možno použít elektrostatické nebo vrcholové voltmetry, tedy u hodnot přesahující 300 kV [1]. Díky tomu, že děliče napětí umožňují zvětšení měřicího rozsahu přístrojů typu jako je voltmetr či osciloskop apod., lze na vstup měřicího přístroje přivést jenom setiny nebo tisíce kV měřeného napětí, které nabývá vysokých hodnot a to stovek kV či dokonce několik MV. [1]

Tak jako u jiných měřicích přístrojů se i na děliče napětí kladou základní požadavky. Tyto požadavky jsou dva: [1]

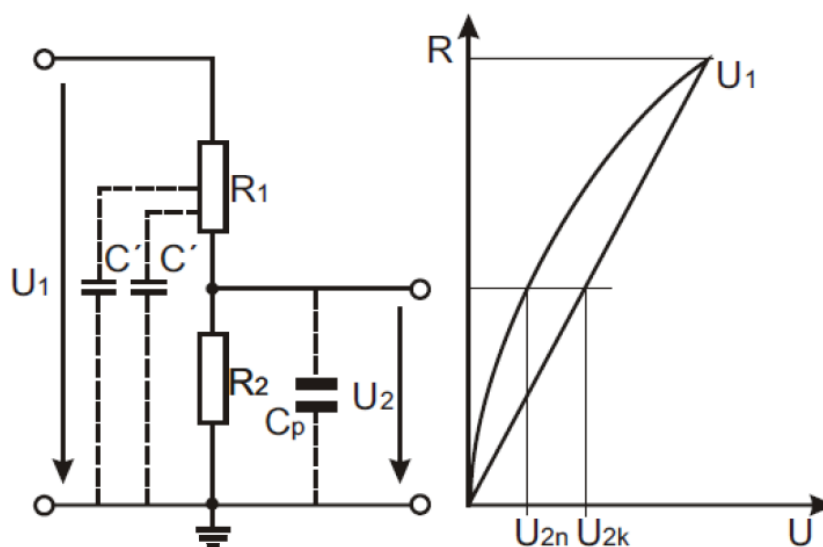
- První požadavek říká, že po připojení děliče napětí k měřenému místu se měřený jev může změnit nepatrně.
- U druhého požadavku se vyjadřuje časový průběh napětí odebíraného z děliče, který by měl představovat věrnou kopii zmenšeného měřeného časového průběhu napětí. Dělič by měl být frekvenčně nezávislý, to znamená, že napětí každé frekvence by mělo být zmenšeno ve shodném poměru.

Děliče napětí se rozdělují na tyto jednotlivé druhy: [1]

- Odporový dělič pro měření stejnosměrných, střídavých a impulzních napětí
- Kapacitní dělič pro měření střídavých a impulzních napětí
- Smíšený dělič pro měření impulzních napětí
- Speciální druhy děličů

4.2.1 Odporový dělič

Odporový dělič je založen na principu dvou rezistorů R_1 a R_2 , které jsou spojeny do série. Pro získání rezistorů o vysokých hodnotách v řádech až několik $k\Omega$ jsou rezistory vyrobeny z keramického tělesa a naplněny kapalinou, nebo jsou bifilárně navinuté vodičem, jehož materiál má vysokou rezistivitu. Pomocí tohoto složení lze získat bezindukční odpory s nepatrnou parazitní kapacitou. [1]



Obr. 16: Náhradní schéma odporového děliče a graf rozložení napětí [1]

Nepřesnost měření mohou způsobit parazitní kapacity C' jednotlivých částí děliče proti zemi a okolním předmětům (viz obr. 16). Pokud je v čase $t = 0$ na vstupní svorky děliče přiveden skok napětí, tak kapacitní proudy o značné velikosti způsobí podél děliče nerovnoměrné rozložení napětí U_{2n} . Po uplynutí určité doby, např. když $t = \infty$ se rozložení napětí zrovnoměří a výsledné napětí na děliči lze potom zapsat jako $U_2 = U_{2k} > U_{2n}$. Vlivem toho následný osciloskopický záznam napětíového impulsu bude vykazovat zkreslení, které podléhá časové konstantě $\tau = R_1 C_p$. Zkreslení se zvětšuje se zvětšující konstantou τ ve srovnání s dobou čela impulsu napětí. Z tohoto důvodu se odporový dělič nepoužívá pro měření krátkodobých impulsů a impulsů s maximální hodnotou napětí převyšující 1000 kV. Pokud by se nedodržela tato zásada, vedlo by to ke zvýšení parazitní kapacity, rezistance a velikosti rozměrů odporu R_1 a to by směřovalo k celkovému nárůstu hodnoty τ . [1]

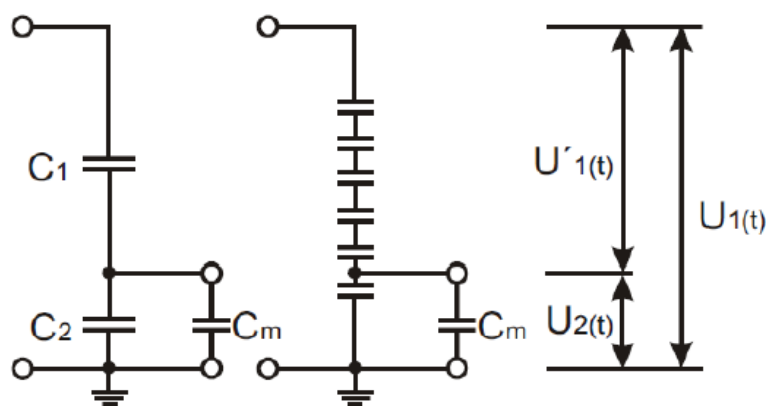
Aby nedocházelo k těmto zkreslením, jsou omezovány pomocí stínících kruhových elektrod, které jsou připevněny na konec odporového děliče a slouží ke kompenzaci proudů. Stínící kruhové elektrody kompenzují proudy, které tečou směrem k odporovému děliči skrz kapacitu stínění, částečně kompenzují proudy parazitními kapacitami a snížením hodnoty C_p zmenšují v určitém rozsahu časovou konstantu τ . [1]

Vzorec pro výpočet dělicího poměru odporového děliče v ustáleném stavu (viz rovnice 4.1) lze vyjádřit jako poměr měřeného napětí $u_1(t)$ ku napětí odváděného z děliče $u_2(t)$. U měření vysokých napětí je doporučeno dodržovat dělicí poměr mezi hodnotami 1:1000 až 1:10000. [1]

$$d = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (4.1)$$

4.2.2 Kapacitní dělič

Kapacitní dělič je založen na principu zapojení dvou kondenzátorů C_1 a C_2 do série, nebo zapojení více kondenzátorů do takzvaného řetězce jako řetězcový dělič (viz obr. 17). Výstupní napětí lze měřit elektrostatickým nebo vrcholovým voltmetrem či miliampérmetrem připojeným na výstupu přes měřicí transformátor. [1]



Obr. 17: Náhradní schéma kapacitního děliče napětí [2]

K vysokonapěťové části kapacitních děličů je často připojován proudový tlumící rezistor, který působí příznivě na zkreslení průběhu výstupního napětí děliče. Při rovnoměrném rozdělení tlumících rezistorů k jednotlivým prvkům kapacitního děliče a vhodného nastavení se dělič při vysokých frekvencích chová jako odporový a při nízkých

frekvencích jako kapacitní. Takto definovaný dělič lze pak aplikovat pro impulzy různého tvaru a pro střídavá napětí v širokém kmitočtovém rozsahu. [1]

Dělicí poměr kapacitního děliče se pohybuje v rozmezí od 1:1000 do 1:10000 a určuje poměr mezi měřeným napětím $u_1(t)$ a napětím odváděného z děliče $u_2(t)$. Tento vztah popisuje rovnice 4.2:

$$d = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2 + C_m}{C_1} \quad 4.2$$

kde C_m představuje kapacitu měřicího přístroje a jeho přívodů. [1]

Dalšími druhy děličů jsou speciální, do kterých lze zařadit kapalinové děliče. Jak už bylo popsáno výše, u odporových děličů mohou vznikat parazitní kapacity a vlastní indukčnost, které mohou mít vliv na zkreslení zaznamenaných průběhů. Tyto nepříznivé vlivy mohou být částečně eliminovány pomocí kapalinových děličů. [8]

5 Návrh modelace tvaru výstupního napěťového impulsu

K určení parametrů rázových generátorů lze dojít několika způsoby. Jedním z nich je určení tvaru napěťového impulsu, respektive určení doby čela a doby půltýlu podle známých konstant odporů a kapacit impulzního generátoru. U druhého z nich je známá doba předepsaného tvaru impulsu a zjišťují se hodnoty konstant tvořené z odporů a kapacit. [2]

Další způsob pro určení parametrů impulzních generátorů je analýza Laplaceovy transformace, který zde nebude popsán. Pro ukázkou je vybrán postup dle [2].

5.1 Obecný postup modelace tvaru výstupního napěťového impulsu

Pro všechna zapojení rázových generátorů je možno vyjádřit výstupní napětí vzorcem (5.1), (kde $t > 0$), který představil Angelini: [2]

$$\eta u = \frac{\alpha U_c}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \left[e^{\frac{-(\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 1})t}{\Theta}} - e^{\frac{-(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1})t}{\Theta}} \right] \quad (5.1)$$

Hodnoty konstant α , η a Θ pro zapojení rázového generátoru na obrázcích (viz obr. 10 a 11) jsou uvedeny v tabulce 2. [2]

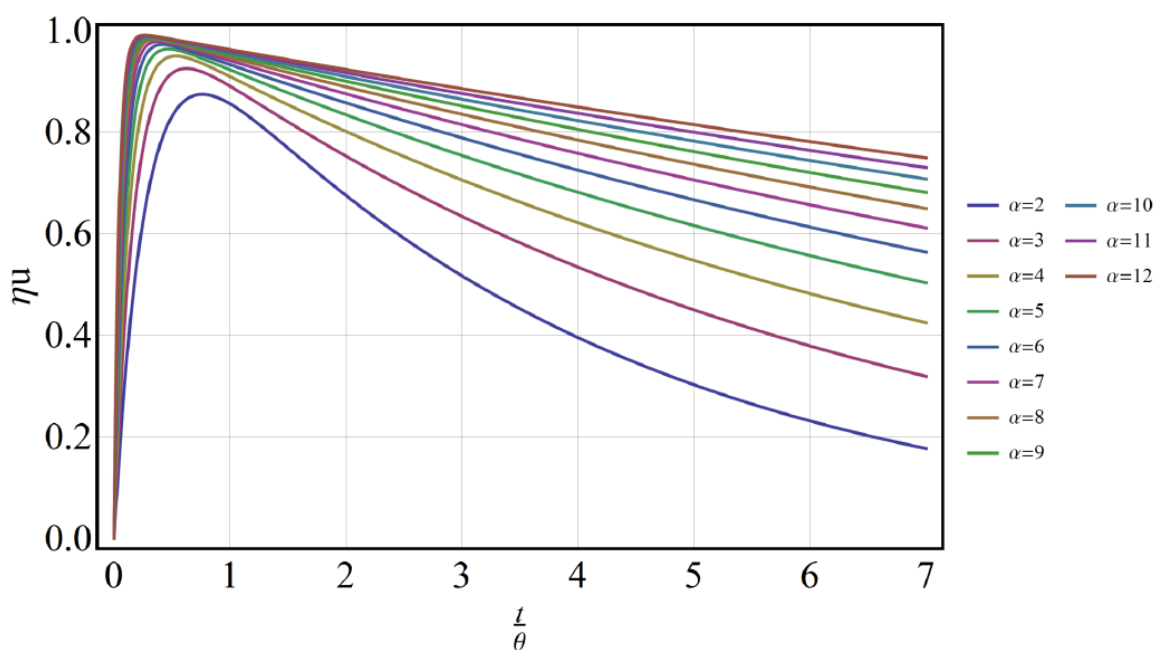
Tab. 2: Hodnoty konstant rázových generátorů [2]

Schéma zapojení:	$\eta =$	$\alpha =$	$\Theta =$
Obr. č. 10	$1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2}$	$\frac{\eta}{2} \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}$	$\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}$
Obr. č. 11	$1 + \frac{C_2}{C_1} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$	$\frac{\eta}{2} \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}$	$\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}$

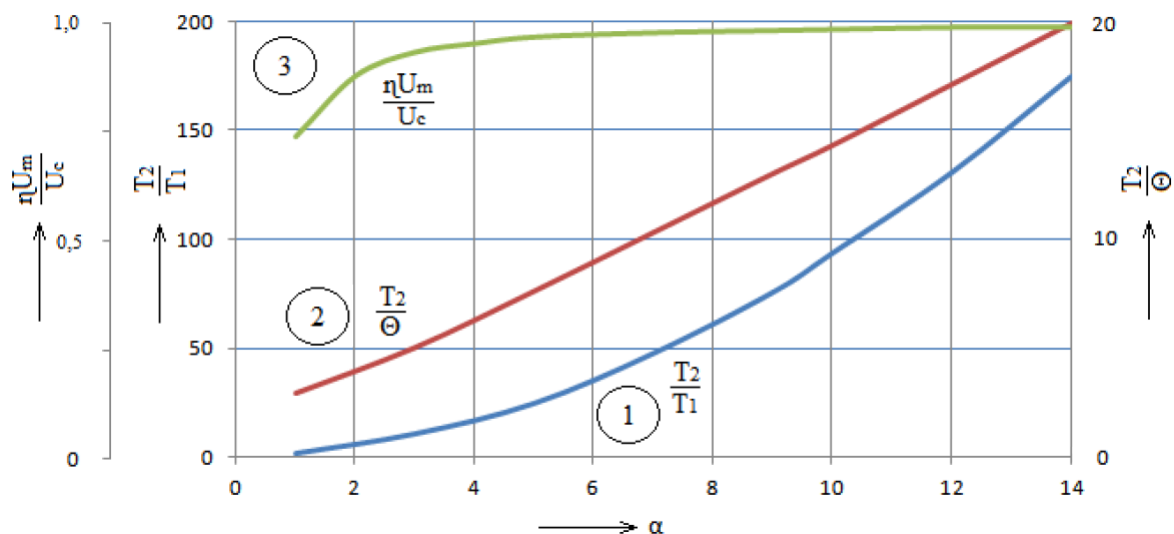
Schéma zapojení:	$X=$	$R_1=$	$R_2=$
Obr. č. 10	$\frac{1}{\alpha^2} \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right)$	$\frac{\alpha\theta}{C_1} (1 - \sqrt{1-X})$	$\frac{\alpha\theta}{C_1 + C_2} (1 + \sqrt{1-X})$
Obr. č. 11	$\frac{1}{\alpha^2} \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right)$	$\frac{\alpha\theta}{C_2} (1 - \sqrt{1-X})$	$\frac{\alpha\theta}{C_1 + C_2} (1 + \sqrt{1-X})$

Při výboji kapacity C_1 se čas počítá od okamžiku jeho vybíjení. Hodnota U_c představuje napětí na činné kapacitě v okamžiku, kdy se na něm vytváří výboj. Hodnota U_m značí maximální napětí při rázu impulzu na testovaném předmětu. [2]

Je zřejmé, že pro konkrétní tvar křivky impulzního napětí právě odpovídá každá hodnota α . Měřítka napětí je přizpůsobeno konstantním činitelem η a měřítka času činitelem $1/\theta$. Pro odlišné hodnoty α (1 až 12) za předpokladu, že $U_c = 1$ jsou tvary impulzních napětí zakresleny v grafu (viz obr. 18), kde ηu je vyjádřeno jako funkcí t/θ . Podle tohoto grafu jsou odvozeny křivky vyjadřující závislost charakteristických hodnot impulzního napětí jako funkci α (viz obr. 19). [2]



Obr. 18: Soubor křivek impulzního napětí vyznačujících ηu dle vzorce (5.1) jako funkci t/θ pro různé velikosti α (převzato z [9])



Obr. 19: Hodnoty T_2/T_1 , T_2/Θ a $\eta U_m/U_c$ jako funkce α (převzato z [9])

5.1.1 Určení tvaru výstupního napětového impulsu

K určení tvaru výstupního napětového impulsu, respektive doby čela T_1 a doby půltýlu T_2 je pro tento výpočet předpokládáno, že konstanty rázového generátoru tj. odpory R_1 , R_2 a kapacity C_1 , C_2 jsou předem známy. Nejdříve jsou spočteny hodnoty parametrů Θ , μ a α . Hodnota Θ představuje parametr času a je udávána v jednotkách $[\mu\text{s}]$ a hodnoty μ , α jsou bezrozměrná čísla. Tyto hodnoty jsou vzaty ze vzorců uvedených v tabulce 2. Potom z křivky 1 podle grafu (viz obr. 19) je pro spočtenou hodnotu α určen poměr T_2/T_1 a z křivky 2 poměr T_2/Θ . Pro získání doby půltýlu T_2 stačí pouze poměr T_2/Θ vynásobit hodnotou Θ . [2]

5.1.2 Určení konstant pro daný napětový impuls

Pro daný napětový impuls je potřeba stanovit konstanty odporů R_1 , R_2 a kapacit C_1 , C_2 rázového generátoru. Obvykle jsou známy hodnoty kapacit a odpory, které modelují tvar vlny, se dopočítávají. U činné kapacity C_1 je její velikost stanovena s ohledem na technické, ekonomické a konstrukční požadavky kladenými na rázový generátor. Pro čistě kapacitní objekt je zvolen optimální poměr kapacit $C_1/C_2 = 4$ až 10 dle [2]. Tento poměr vede i k dobrému využití generátoru U_m/U_c . [2]

Pro zjištění neznámých odporů je nejprve spočten poměr mezi dobou čela a dobou půltýlu, tedy T_2/T_1 . Z grafu pro tento poměr (viz obr. 19) podle křivky 1 se odečte

hodnota α . Na křivce 2 téhož grafu hodnotě α náleží konkrétní velikost poměru T_2/Θ , ze kterého lze rovnou spočítat Θ , jelikož parametr T_2 je znám. Následně je spočten pomocný činitel X z tabulky 2. Dosazením již známých parametrů α , Θ a X do vzorců z této tabulky lze dopočítat neznámé odpory R_1 a R_2 určující tvar napěťové vlny. [2]

5.2 Výpočet konstant atmosférického napěťového impulsu

Pro dosažení atmosférického impulsu $1,2/50 \mu\text{s}$ podle normy ČSN EN 60060-1 lze impuls určit pomocí konstant rázového generátoru, které modelují tvar této vlny. Rázový generátor je sestaven ze šesti stupňů podle schématu zapojení na obrázku č. 13. a nachází se v laboratořích na Fakultě elektrotechnické ZČU v Plzni. Jedná se o model stolního rázového generátoru vyrobeného studentem této fakulty v minulých letech [10]. Hodnoty generátoru jsou známy, dílčí činná kapacita C je 220 nF a nabíjecí odpory R jsou $100 \text{ k}\Omega$. Pro snazší výpočet zbývajících konstant (kapacit C_1 , C_2 a odporů R_1 , R_2) lze vycházet ze schématu jednostupňového rázového generátoru (viz obr. 10) a postupů výpočtů z podkapitoly 5.1.2. Činná kapacita C_1 se spočte jako podíl dílčí činné kapacity C a počtu stupňů n :

$$C_1 = \frac{C}{n} = \frac{220 \cdot 10^{-9}}{6} = 36,67[\text{nF}] \quad 5.2$$

Pro čistě kapacitní charakter se zatěžovací kapacita C_2 dopočte z optimálního poměru kapacit $C_1/C_2 = 4$ až 10 . Z tohoto poměru vyplývá, že zatěžovací kapacita C_2 bude nabývat hodnot v rozmezí od $9,17 \text{ nF}$ až do $3,67 \text{ nF}$.

Odpory R_1 a R_2 , jež modelují daný tvar výstupního impulsu generátoru, se určí pomocí následujících výpočtů. Nejprve se získá hodnota poměru T_2/T_1 :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot 10^{-6}} = 41,7 \quad 5.3$$

Podle této hodnoty odečteme z křivky 1 parametr α , který má velikost $6,5$ (viz obr. 19). Z křivky 2 odečteme parametr $T_2/\Theta = 9,5$, ze kterého lze vyjádřit Θ :

$$\theta = \frac{T_2}{9,5} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{9,5} = 5,263 [\mu s] \quad 5.4$$

Dále je potřeba určit pomocný činitel X ze vztahu (viz tab. 2):

$$X = \frac{1}{\alpha^2} \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right) = \frac{1}{6,5^2} \left(1 + \frac{36,7 \cdot 10^{-9}}{5 \cdot 10^{-9}} \right) = 0,1974 [-] \quad 5.5$$

Nyní jsou spočteny všechny potřebné parametry pro stanovení odporů R_1 a R_2 podle vzorců z tabulky 2:

$$R_1 = \frac{\alpha\theta}{C_1} (1 - \sqrt{1 - X}) = \frac{6,5 \cdot 5,263 \cdot 10^{-6}}{36,7 \cdot 10^{-9}} (1 - \sqrt{1 - 0,1974}) = 97 [\Omega] \quad 5.6$$

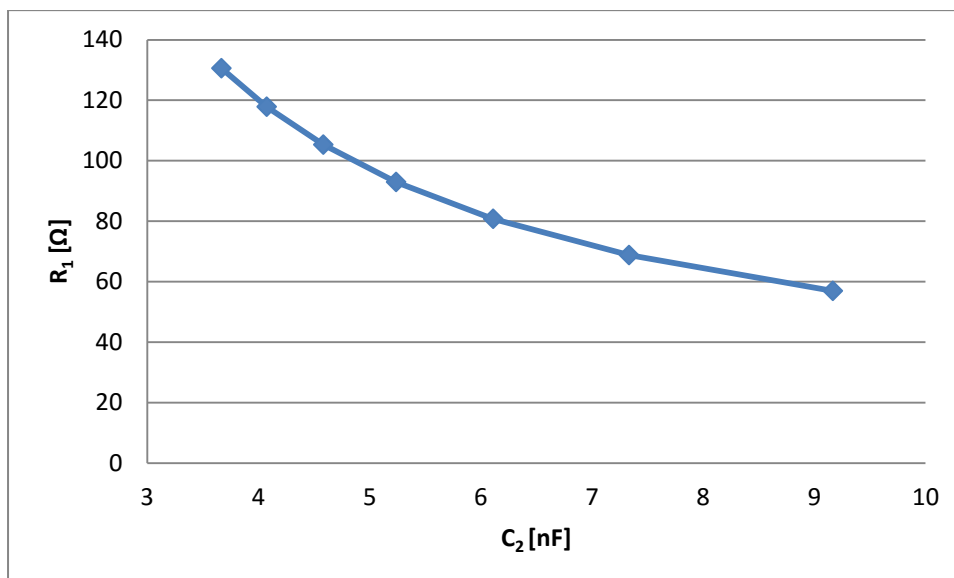
$$R_2 = \frac{\alpha\theta}{C_1 + C_2} (1 + \sqrt{1 - X}) = \frac{6,5 \cdot 5,263 \cdot 10^{-6}}{36,7 \cdot 10^{-9} + 5 \cdot 10^{-9}} (1 + \sqrt{1 - 0,1974}) = 1479 [\Omega] \quad 5.7$$

Jako optimální parametr z poměru kapacit C_1/C_2 byla zvolena hodnota zatěžovací kapacity $C_2 = 5$ nF.

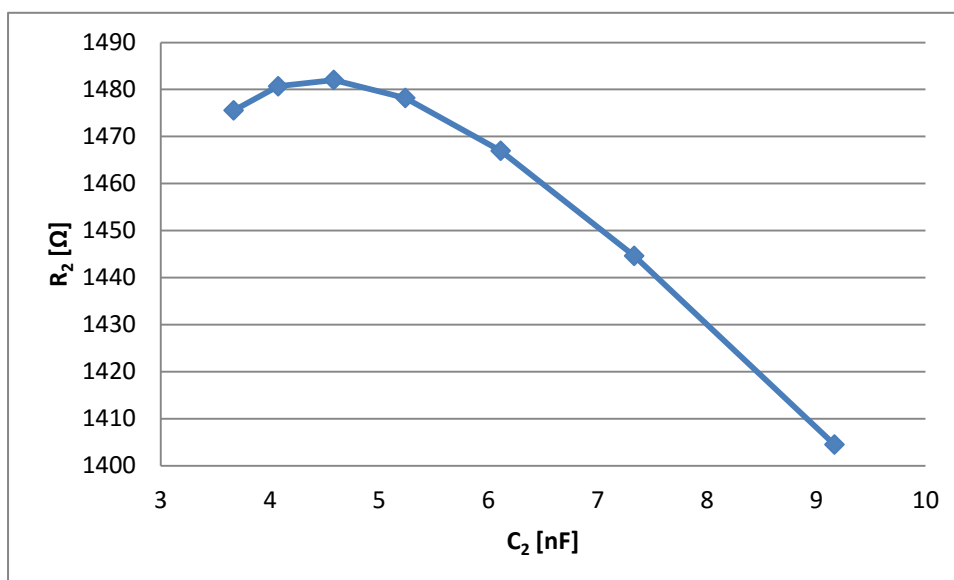
Pokud by byla zvolena jiná hodnota zatěžovací kapacity C_2 , musí se provést celý výpočet znova. V tabulce 3 jsou spočteny hodnoty odporů R_1 a R_2 pro zatěžovací kapacitu C_2 z optimálního poměru C_1/C_2 a následně přeneseny do grafů (viz obr. 20 a 21)

Tab. 3: Hodnoty odporů R_1 a R_2 v závislosti na zatěžovací kapacitě C_2

C_2 [nF]	R_1 [Ω]	R_2 [Ω]
9,17	56,95	1404,49
7,33	68,79	1444,61
6,11	80,79	1466,95
5,24	92,96	1478,19
4,58	105,32	1482,03
4,07	117,86	1480,68
3,67	130,60	1475,56



Obr. 20: Graf zobrazující čelní odpor R_1 v závislosti na zatěžovací kapacitě C_2



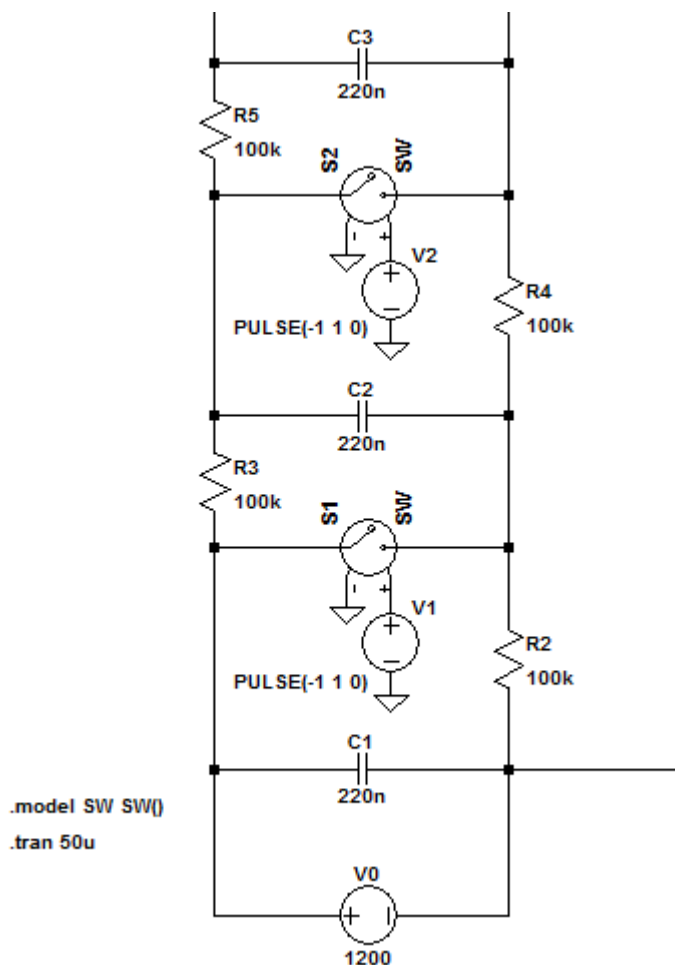
Obr. 21: Graf zobrazující týlní odpor R_2 v závislosti na zatěžovací kapacitě C_2

5.3 Simulace impulzního generátoru napětí

K simulaci a ověření správnosti navržených parametrů rázového generátoru z výpočtů z podkapitoly 5.2 byl použit program LTspice, který je volně ke stažení ze stránek společnosti Linear Technology. Program je rozdělen na tři části, kde první část tvoří grafický editor schémat, který dovoluje uživatelům vytvářet nebo upravovat schéma obvodu. Druhou částí programu je vysoce výkonný Spice simulátor nazvaný LTspice a poslední částí je postprocessor sloužící pro názornou vizualizaci výsledných průběhů v simulovaných obvodech. [11]

5.3.1 Šestistupňový impulzní generátor napětí modelující tvar atmosférického impulzu

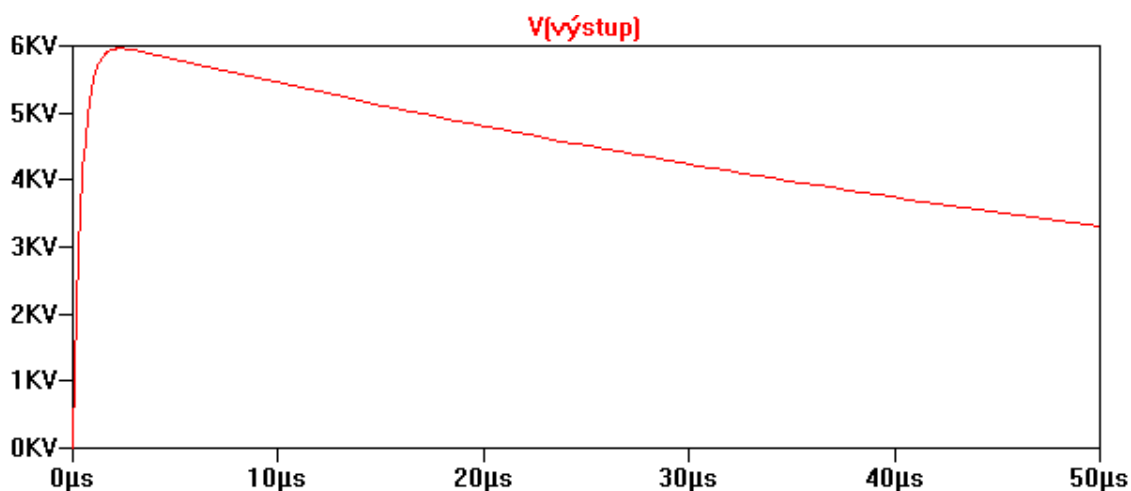
Pro simulaci šestistupňového rázového generátoru napětí se vycházelo ze schématu zapojení z podkapitoly 3.1.2, obr. 13. Na obrázku 22 lze vidět část tohoto schématu v prostředí programu LTspice. Z důvodu značné rozsáhlosti těchto schémat jsou jejich celé formy vyobrazeny v přílohách.



Obr. 22: Schéma šestistupňového generátoru v programu LTspice

V části tohoto schématu na obrázku 22 lze spatřit stejnosměrný nabíjecí zdroj V0 o hodnotě 1200 V, tři nabíjecí stupně generátoru označené jako C1, C2 a C3 o hodnotách 220 nF a patřičné nabíjecí odpory o velikosti 100 k Ω . Jiskřiště bylo nahrazeno napěťově řízeným prepínačem označeným jako SW S1 a S2, který je řízen pomocí pulzního napěťového zdroje, jež v určitém čase mění svojí velikost napětí a tím ovládá funkci prepínače. Ve schématu lze dále zpozorovat různé příkazy začínající tečkou. Tyto příkazy, neboli takzvané directives slouží v LTspice pro řízení simulace. Příkaz „.tran 50u“

znamená pro LTspice přechodnou (transient) analýzu o délce trvání 50 μs [11]. Tento příkaz se vytvoří automaticky sám po stisknutí tlačítka simulace, kde program požaduje doplnění určitých parametrů od uživatele, nebo si jej uživatel může vytvořit manuálně sám před spuštěním simulace. Příkaz „.model SW SW()“ slouží pro definování napěťově řízeného přepínače, bez kterého by daný model nefungoval a uživatel musí tento příkaz zadat ručně. Na obrázku 23 lze pak vidět výstupní napětí šestistupňového generátoru modelující tvar atmosférického impulzu. [11]



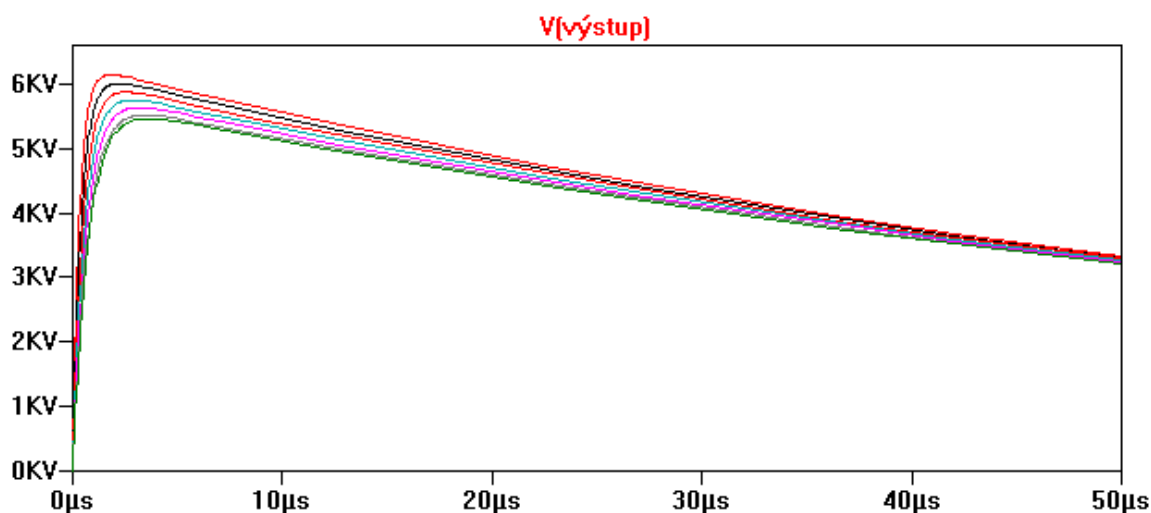
Obr. 23: Graf výstupního napětí šestistupňového rázového generátoru

Z obrázku 23 vyplývá, že obecný tvar rázové vlny odpovídá předpokladům a požadavkům kladeným na tento stolní rázový generátor. Rázová vlna však ve svém „čele“ nesplňuje požadavek normy ČSN 60060-1. Odchylka nevyhovuje toleranci $\pm 30\%$ z doby čela $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$, tedy rozmezí $0,84 \mu\text{s}$ až $1,56 \mu\text{s}$. K tomu, aby výstupní impulz byl v tolerancích normy, je možno zmenšit hodnotu čelního odporu R_1 , který způsobí rychlejší nárůst čela impulzu za kratší dobu dosažení jeho maxima. Doba půltýlu T_2 je v daných tolerančních mezích v rozmezí $\pm 20\%$ z T_2 , což je $40 \mu\text{s}$ až $60 \mu\text{s}$. Při prodloužení časové osy se doba půltýlu dostane na poloviční hodnotu z hodnoty vrcholové. Dále si lze všimnout, že maximální výstupní hodnota je menší než $7,2 \text{ kV}$. Hodnota $7,2 \text{ kV}$ je získána násobkem nabíjecího napětí 1200 V a počtem šesti stupňů generátoru. Tento pokles napětí je způsoben samotnou účinností generátoru, která je menší než 100% .

Pro dosažení normovaného tvaru rázové vlny bylo nutno R_1 modifikovat proti výsledku výpočtu dle [2].

5.3.2 Působení kapacitní zátěže na výstupní rázovou vlnu generátoru

K určení působení kapacitní zátěže na výstupní tvar vlny rázového generátoru je vycházeno z hodnot optimálního poměru kapacit C_1/C_2 [2] pro čistě kapacitní charakter. Zatěžovací kapacita v rozmezí od 3,67 nF až do 9,17 nF lze v programu LTspice vykreslit pomocí křivek do jednoho grafu. K tomu lze využít takzvané „SPICE Directive“ [11,12], kde je možno po vyvolání okna napsat příkaz „step PARAM C 3.67n 9.17n 1n“ [11,12], který vyjadřuje rozmezí hodnot od 3,67 nF do 9,17 nF s krokem 1nF pro měnící se kapacitu C. Tato kapacita musí být přiřazena k dané komponentě ve schématu jako hodnota „{C}“ [11,12]. Výsledný graf je znázorněn na obrázku 24.



Obr. 24: Graf působení zatěžovací kapacity na tvar vlny rázového napětí

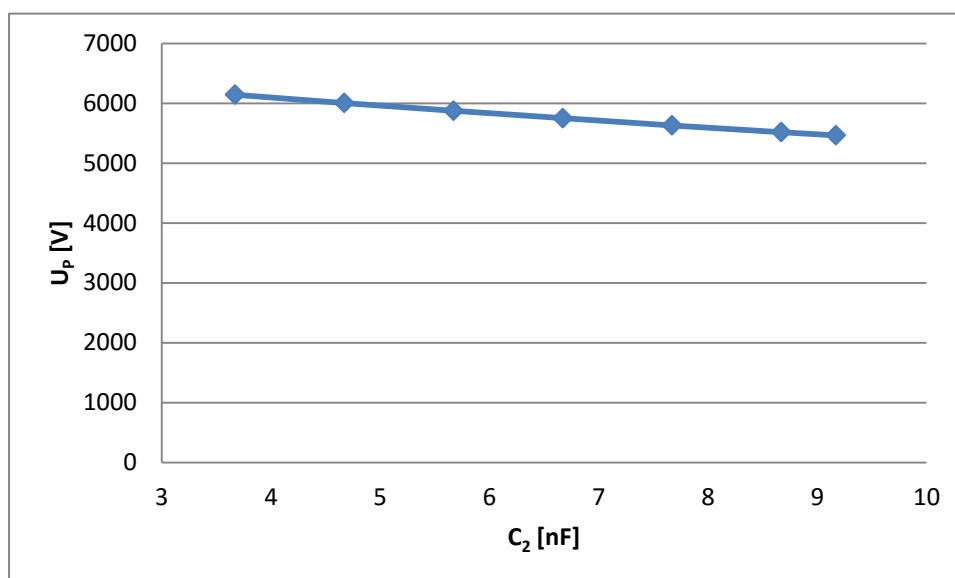
Z grafu na obrázku 24 lze vidět, že s narůstající hodnotou velikosti zatěžovací kapacity klesá maximální hodnota výstupního napětí generátoru. Dále lze z grafu zpozorovat, že doba k dosažení vrcholové hodnoty impulzu se zvětšující se zatěžovací kapacitou je prodloužena a důsledkem toho překračuje normou stanovené tolerance dle [4].

K tomu, aby mohla být použita větší kapacitní zátěž, lze dosáhnout modifikací rázového generátoru, a to snížením jeho počtu stupňů n . [3] Změnou počtu stupňů se změní velikost činné kapacity $C_1 = \frac{C}{n}$, kde C je dílčí činná kapacita jednoho stupně generátoru, a tím se změní poměr kapacit C_1/C_2 . [2]

V tabulce 4 jsou uvedeny hodnoty maximálního výstupního napětí šestistupňového generátoru v závislosti na jednotlivých zatěžovacích kapacitách. Následující výsledky jsou promítnuty do grafu (viz obr 25).

Tab. 4: Hodnoty maximálního výstupního napětí v závislosti na zatěžovací kapacitě

U_P [V]	C_2 [nF]
6144	3,67
6005	4,67
5874	5,67
5750	6,67
5631	7,67
5519	8,67
5465	9,17



Obr. 25: Graf maximálního výstupního napětí v závislosti na zatěžovací kapacitě

V grafu na obrázku 25 lze taktéž vidět, že se zvyšující hodnotou zatěžovací kapacity klesá výstupní maximální hodnota.

5.4 Ověření návrhu modelace čela, týlu, a useknutého napěťového impulsu pomocí odporového děliče

K ověření návrhu modelace byl použit stolní rázový generátor vyrobený studentem fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni [10] pro který byly navrženy odpory modelující tvar atmosférického napěťového impulsu. Pro změření výstupního napětí víceúhňového generátoru lze použít více způsobů. Námí zvolený způsob byl pomocí odporového děliče napětí, který dokáže výstupní napětí rázového generátoru zmenšit v daném poměru

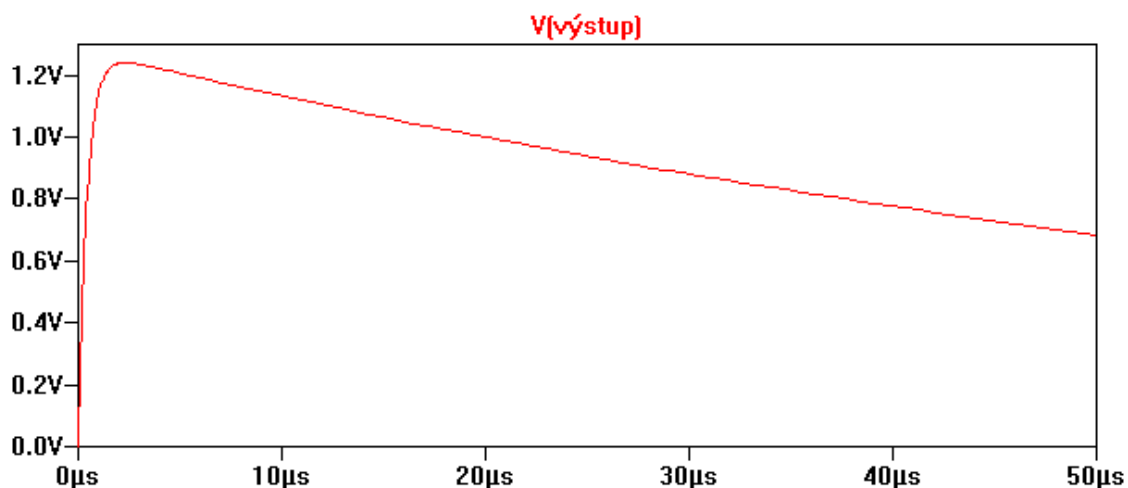
na měřitelnou hodnotu a pomocí osciloskopu ho změřit. Odporový dělič byl vyroben předem za účelem tohoto měření a jeho parametry jsou $R_1 = 240 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 50 \text{ }\Omega$ s dělicím poměrem 1:10000 (viz obr. 26).



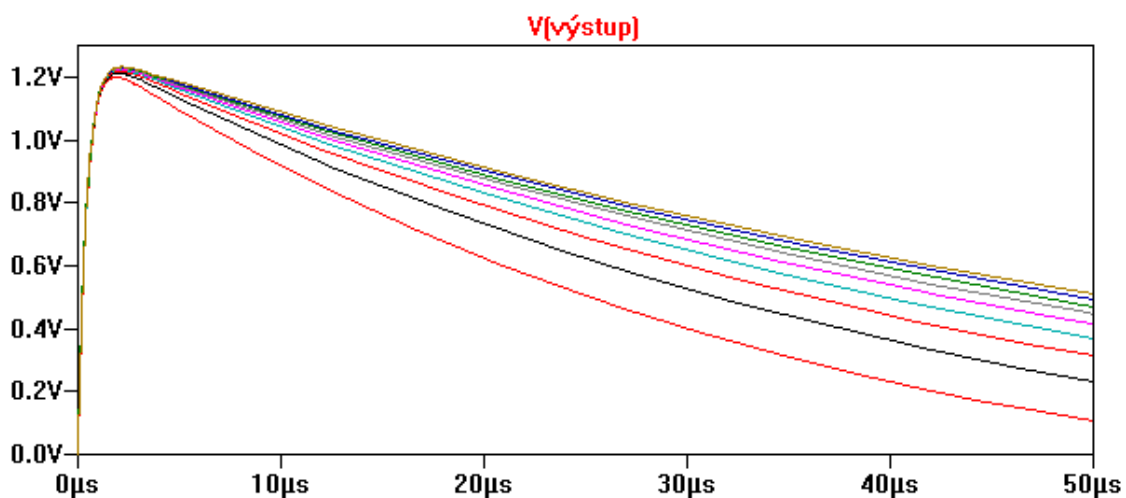
Obr. 26: Odporový dělič napětí

Celé schéma zapojení tohoto měření je zobrazeno v přílohách. Rázový generátor je napájen stejnosměrným zdrojem napětí z Delonova násobiče o výstupní hodnotě 1200 V. Po sestavení obvodu bylo zjištěno, že studentem postavený zdroj napětí neměl zemní svorku. Z tohoto důvodu nemohl být uzavřen okruh obvodu s osciloskopem a následně nemohl být změřen impulz výstupního napětí. Navíc bylo zjištěno, že po připojení odporového děliče se dílčí činné kapacity rázového generátoru nedokázaly plně nabít, jelikož odporový dělič generátor ihned vybíjel. Odporový dělič byl modifikován připojením oddělovací kapacity do série před hodnoty odporů R_1 , R_2 tvořící dělič napětí a měla by zamezit vybíjení činných kapacit rázového generátoru. K určení této kapacity byla použita simulace a její hodnota byla získána odečtením z grafu tak, aby její velikost co nejméně ovlivňovala tvar výstupního napětí rázového generátoru. Na obrázku 27 lze vidět graf zmenšeného výstupního napětí pomocí odporového děliče a na obrázku 28 s přidanou oddělovací kapacitou před dělič napětí v zapojení do série. Graf z obrázku 28 znázorňuje řadu křivek, kde jejich hodnoty začínají od 200 pF (spodní křivka) do 1000 pF (horní křivka) s krokem 100 pF. Velikost této kapacity byla stanovena na 800 pF, jelikož s větší hodnotou kapacity roste výstupní napětí v čase 50 μs minimálně. Hodnota

výstupního napětí odporového děliče v čase $50 \mu\text{s}$ je 685 mV a s použitou kapacitou v čase $50 \mu\text{s}$ je 472 mV . Toto řešení ovšem není konečné ani ideální. Takto modifikovaný měřicí obvod pouze umožňuje zaznamenat výstupní impulz pro účely demonstrace modelu generátoru, např. pro dny otevřených dveří FEL. Výsledný tvar napěťové vlny je ovlivněn.



Obr. 27: Graf zmenšeného výstupního napětí pomocí odporového děliče

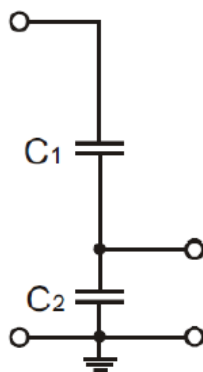


Obr. 28: Graf výstupního napětí pomocí odporového děliče s přidanou oddělovací kapacitou

Další možnou alternativou pro měření výstupního napětí impulzního generátoru je použití kapacitního děliče napětí. Tento dělič by měl předejít problému vybíjení dílčích činných kapacit generátoru, tak jako to bylo u odporového děliče napětí. V následující kapitole je navrhnout tento dělič a výsledky ověřeny pomocí simulace v programu LTspice.

5.4.1 Návrh kapacitního děliče napětí

Kapacitní dělič slouží k měření střídavých a impulzních napětí. Oproti odporovému děliči reprodukuje věrnější výstupní měřené hodnoty. Jak už bylo popsáno výše, kapacitní dělič je v principu zapojení dvou kapacit C_1 a C_2 do série. Zapojení kapacitního děliče je znázorněno na obrázku 29.



Obr. 29: Kapacitní dělič napětí [1]

Z obrázku 29 je patrné, že se měří úbytek napětí na kondenzátoru C_2 . Velikost dělicího poměru je potom dána velikostí kapacit C_1 a C_2 a následně je popsána vzorcem 5.8.

$$d = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad 5.8$$

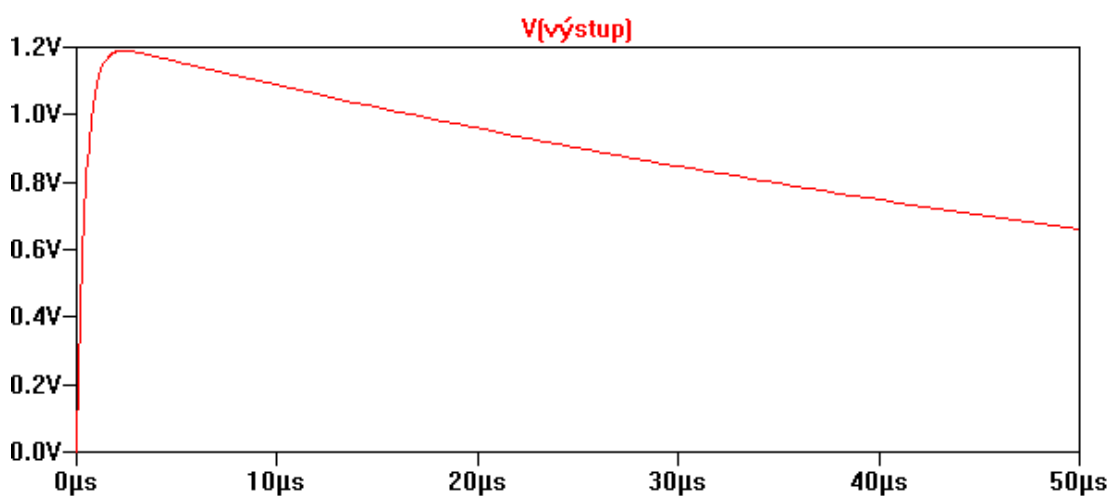
Pro získání měřitelného napětí v jednotkách voltů musí být stanoven velký dělicí poměr, který bude určovat velikosti kapacit, kde kapacita C_2 bude mnohonásobně větší než kapacita C_1 . Z grafu (viz obr. 23) lze vidět výstupní napětí o hodnotě jednotek kilovoltů a výstupní napětí chceme měřit v jednotkách voltů. Z toho vyplývá, že dělicí poměr bude v řádech tisíců tak aby se vešel mezi stanovené hranice od 1:1000 do 1:10000. Uvažované kapacity s ohledem k velkému dělicímu poměru byly stanoveny o velikostech $C_1 = 100$ pF a $C_2 = 500$ nF. Dělicí poměr je určen dle následujícího vzorce:

$$d = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = \frac{100 \cdot 10^{-12} + 500 \cdot 10^{-9}}{100 \cdot 10^{-12}} = 5001 [-] \quad 5.9$$

Na obrázku 23 byla z grafu odečtena výstupní maximální hodnota o velikosti napětí 5961 V. V následujícím vzorci 5.10 byla tato hodnota použita k určení výpočtu výstupní velikosti napětí pomocí kapacitního děliče.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \Rightarrow U_2 = \frac{C_1 U_1}{C_1 + C_2} = \frac{100 \cdot 10^{-12} \cdot 5961}{100 \cdot 10^{-12} + 500 \cdot 10^{-9}} = 1,19 [V] \quad 5.10$$

K ověření správnosti výsledků byla vytvořena simulace výstupního napětí impulzního generátoru s návrhem kapacitního děliče (viz obr. 30).



Obr. 30: Graf výstupního napětí pomocí kapacitního děliče

Z grafu na obrázku 30 lze ověřit správnost teoretického výpočtu, kde výstupní hodnota napětí ve svém maximu se shoduje s návrhem číselného výpočtu ze vztahu 5.10. Tento návrh je však pouze zjednodušený. Výsledný napěťový dělič musí vykazovat vhodnou přenosovou frekvenční charakteristiku, aby měřený signál v rámci tolerance odpovídal skutečnému průběhu napětí.

Závěr

Diplomová práce popisuje ve svém úvodu principy a funkci rázového generátoru. Teoretická část je rozdělena na čtyři hlavní kapitoly, kde jako první byly vysvětleny jednotlivé druhy impulzního napětí, popsány tvary impulzů a doby jejich trvání podle platné technické normy ČSN EN 60060-1. Další kapitola byla zaměřena na zkušební postupy, které jsou nedílnou součástí pro testování zařízení a součástek vysokého napětí k určení elektrické pevnosti izolačních materiálů. V následujícím textu jsou popsány samotné rázové generátory, které jsou rozděleny na jednostupňové a vícestupňové. Pro každý z nich je popsán jeho princip a funkce. Poslední kapitola byla věnována měření vysokých napětí a velkých proudů, kde byly rozděleny a popsány jednotlivé metody k měření výstupního napěťového impulzu generátoru.

Praktická část této práce byla zaměřena na modelaci tvaru atmosférického výstupního napěťového impulzu stanoveného normou jako impulz $1,2/50 \mu\text{s}$. K určení konstant zahrnujících odpory a kapacity rázového generátoru pro modelaci výstupního tvaru impulzu bylo vycházeno z parametrů generátoru postaveného studentem Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v minulých letech, kde velikost dílčí činné kapacity byla 220 nF . Hodnota zatěžovací kapacity byla vzata z optimálního poměru kapacit C_1/C_2 . Pro určení odporů R_1 a R_2 se vycházelo ze vzorců a křivek dle Angeliniho. Odpor pro modelaci čela R_1 vyšel 97Ω a odpor pro modelaci týlu R_2 vyšel 1479Ω . K ověření výstupního tvaru impulzu byl použit odporový dělič napětí s dělicím poměrem $1:10000$. Při analýze možností měření na zmiňovaném generátoru byla zjištěna pro navržené testy nevhodná vnitřní struktura nabíjecího zdroje. Z tohoto důvodu bylo po konzultaci s vedoucím práce praktické ověřování navrženého obvodu pro modelaci výstupní rázové vlny měření nahrazeno analýzou problému, návrhem modifikací struktury celého zařízení resp. obvodu pro měření vysokonapěťového výstupu. Uvedené úpravy byly pak již ověřeny pouze vytvořením simulačních schémat a následně získání grafů výstupních napětí v programu LTspice. Z grafu pro atmosférický impulz výstupního napětí bylo zjištěno, že doba čela není v daných tolerančních mezích dle příslušné normy. Jako možné opatření je možno zmenšit čelní odpor. Dále je ukázán vliv zatěžovací kapacity na samotný generátor, kde s rostoucí zatěžovací kapacitou klesá maximální hodnota impulzu a roste časová konstanta čela impulzu. Jako další problém při měření bylo zjištěno vybíjení dílčích kapacit

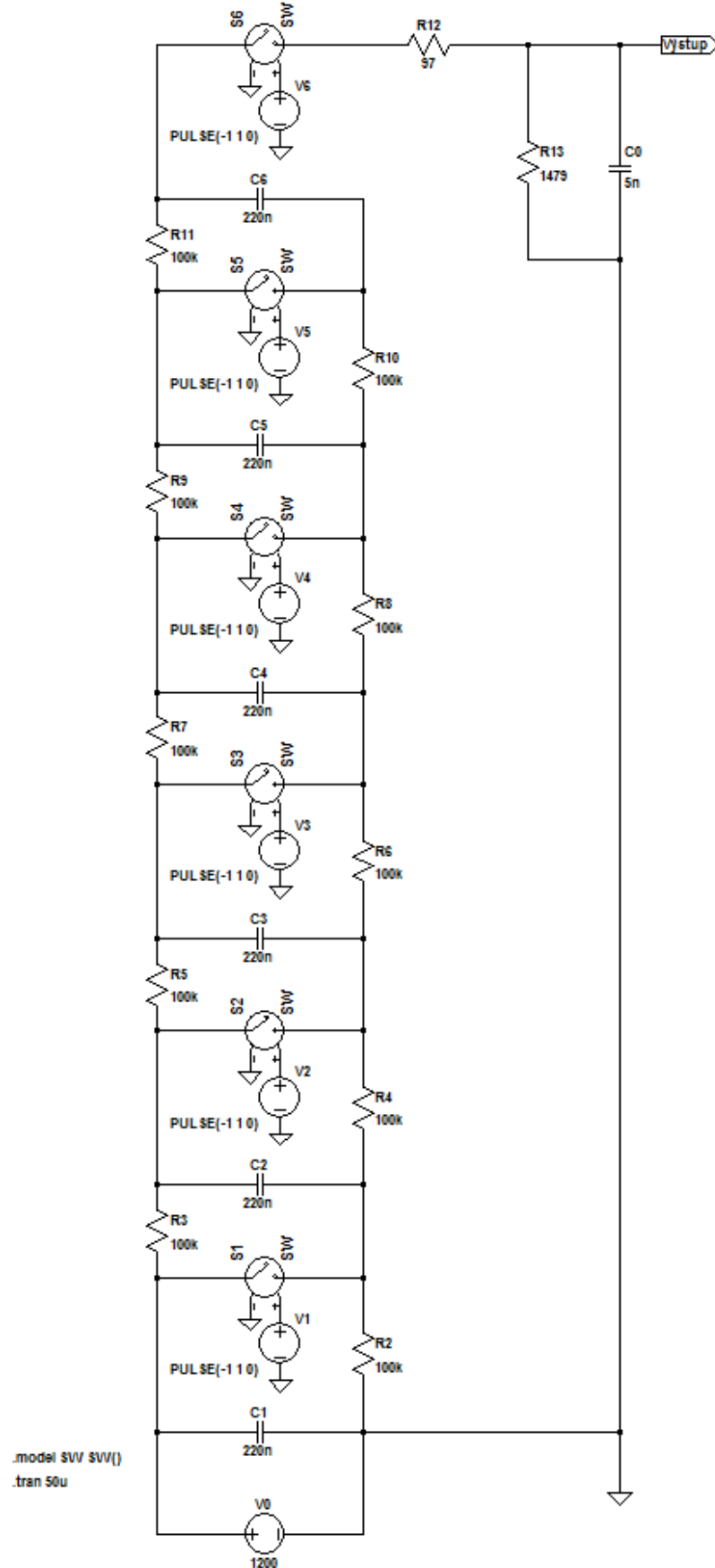
generátoru způsobené odporovým děličem napětí. Tento problém byl nasimulován a k jeho odstranění bylo navrženo přidání oddělovací kapacity do série před odporový dělič. Následně byla provedena simulace ovlivnění tvaru týlu impulzu. Z tohoto důvodu byl navržen kapacitní dělič pro odstranění tohoto problému. Pro ověření teoretických předpokladů návrhu kapacitního děliče bylo vytvořeno simulační schéma a následně simulován tvar výstupního impulzu. Maximální hodnota výstupního napětí ze simulace byla shodná s teoretickým výpočtem. Veškerá funkční simulační schémata byla navrhována jako ideální, bez působení nepříznivých vlivů jako jsou parazitní kapacity a indukčnosti, které ovlivňují tvar výstupního napětí generátoru při reálném měření. Návrhy uvedené v závěru této diplomové práce mohou posloužit ke konečnému vyřešení problémů spojených s uvedením stolního rázového generátoru do laboratorní praxe.

Seznam literatury

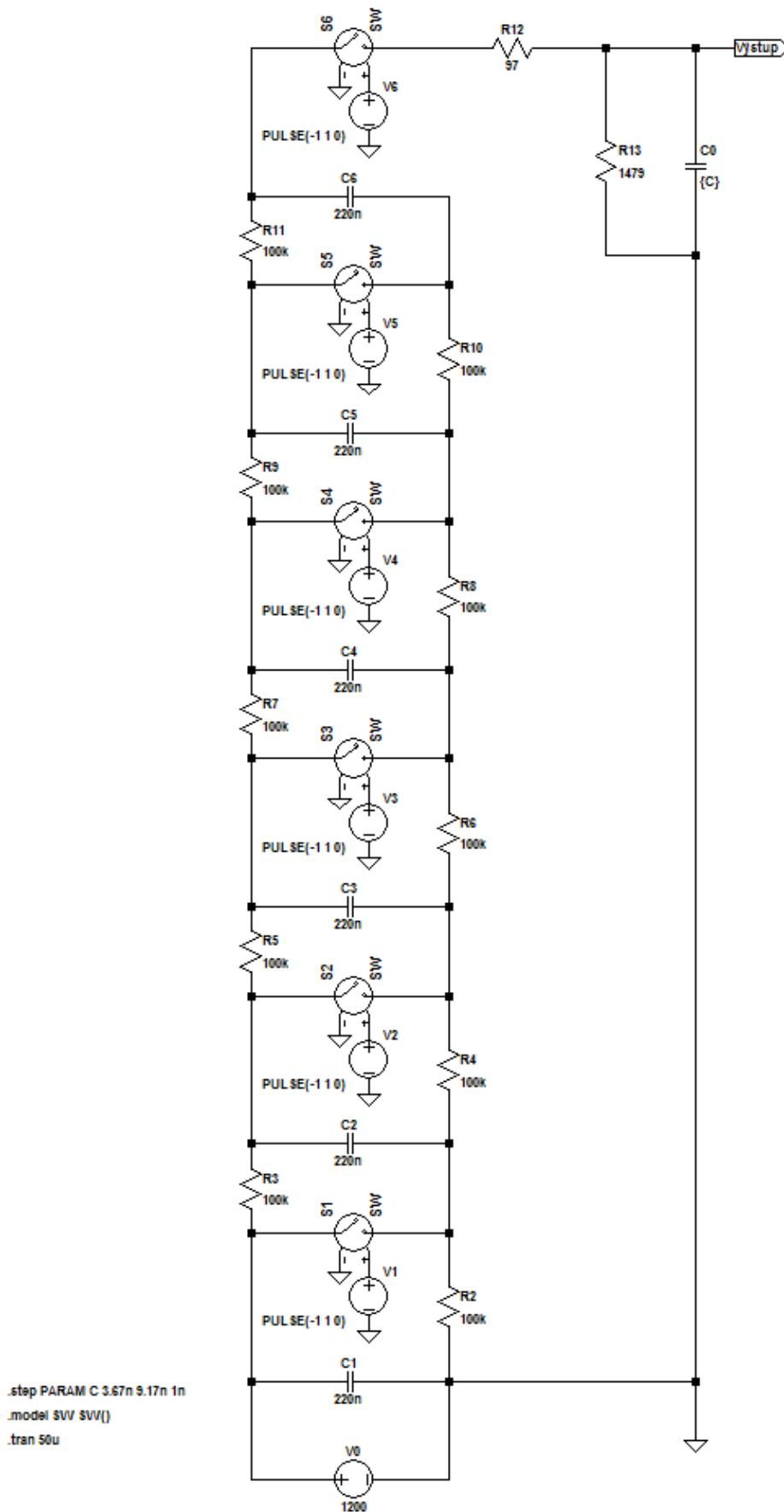
- [1] Vladimír Blažek, Petr Skala, *Vysoké napětí a elektrické přístroje část I: Vysoké napětí*, VUT Brno
- [2] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 2. přepr. vyd. Praha 1: SNTL, 1978, 296 s.
- [3] KUFFEL, E, W ZAENGL a J KUFFEL. *High voltage engineering: fundamentals*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000, xiii, 539 p. ISBN 978-0-7506-3634-6.
- [4] ČSN EN 60060-1. *Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. 2011.
- [5] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 9788073002329.
- [6] Marx generator. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation 2001, 2016 [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Marx_generator
- [7] Impulse generator. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation 2001, 2016 [cit. 2016-01-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Impulse_generator
- [8] CMÍRAL, Jan. *Vysokonapěťové kapalinové děliče pro měření rychlých přechodných dějů*. 2015. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Jan Hlaváček.
- [9] *Technika vysokých napětí: Zdroje vysokých napětí* [online]. [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/TVNPodklady/TVN_Zdroje_Vysokych_Napeti_1_0.pdf
- [10] SINGER, Michal. *Stolní rázový generátor*. Fakulta elektrotechnická, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Pavel Trnka.
- [11] PÁNEK, David, Václav KOTLAN a Pavel KARBAN. *LTspice* [online]. 2011 [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~lsroubov/TE1/LTspice_navod.pdf
- [12] *LTspice Tutorial* [online]. 2016 [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: <http://denethor.wlu.ca/ltspice/>

Přílohy

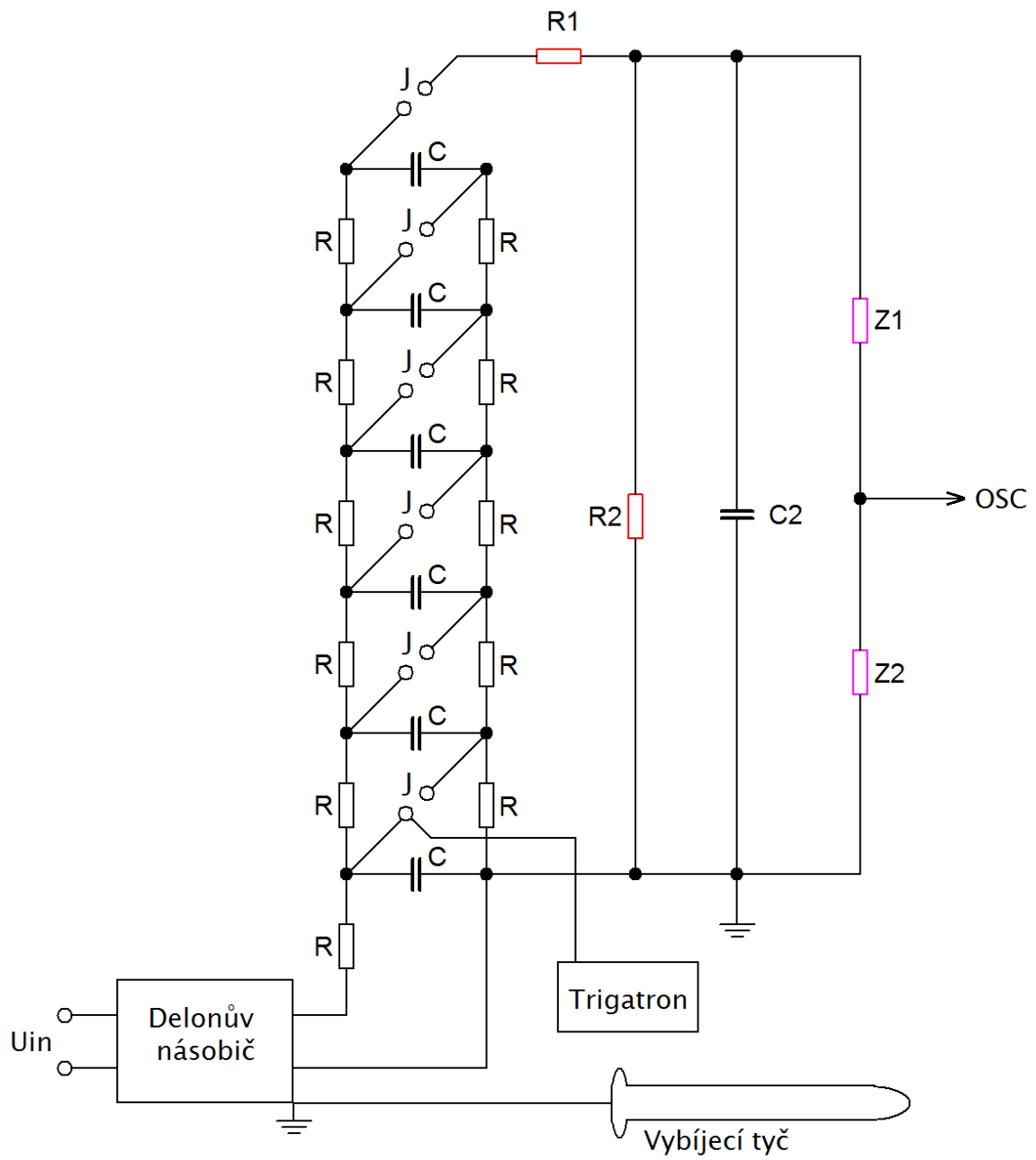
Příloha A – Simulační schéma šestistupňového generátoru



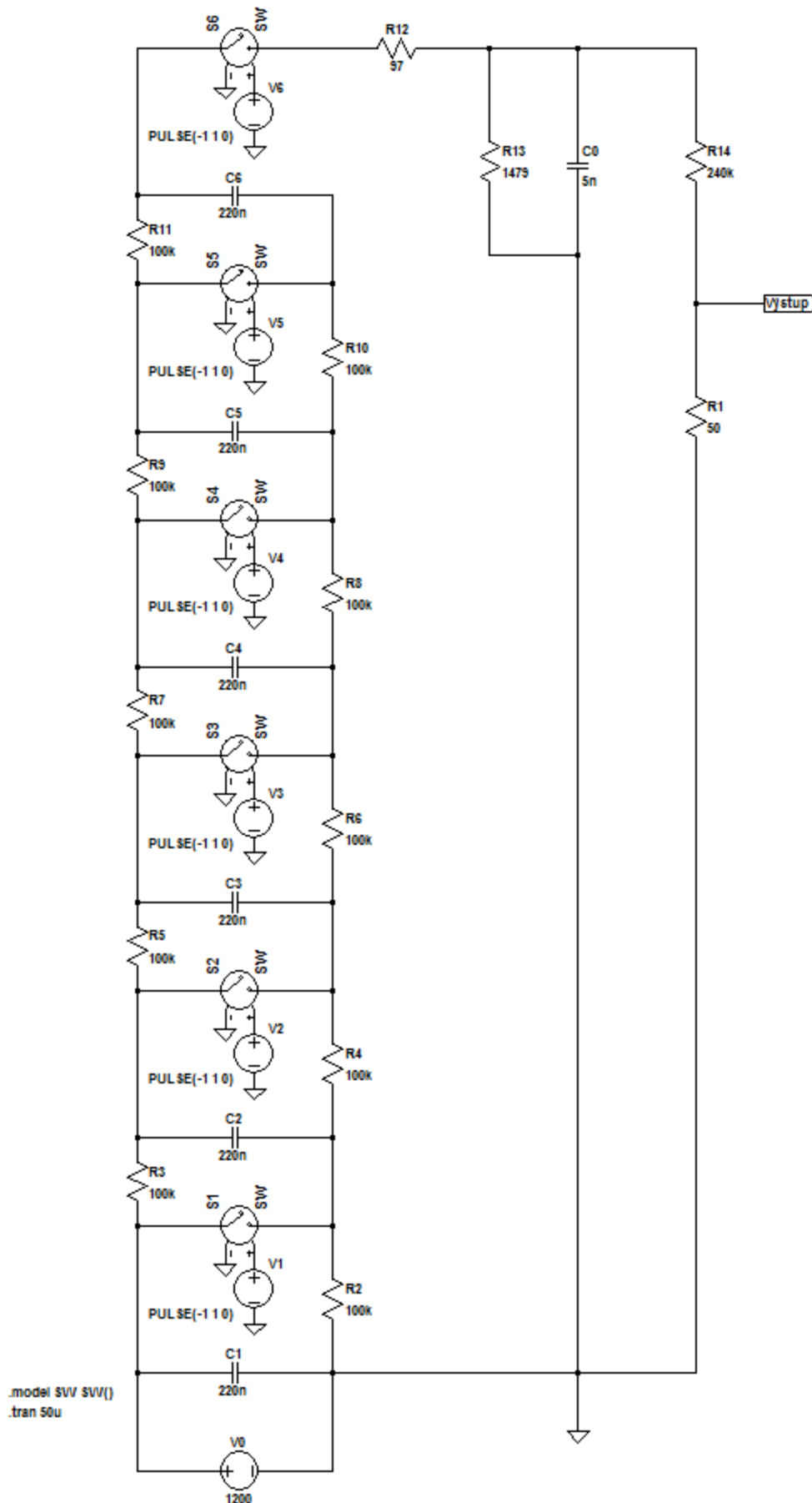
Příloha B – Simulační schéma šestistupňového generátoru s proměnnou zatěžovací kapacitou



Příloha C - Schéma zapojení stolního rázového generátoru



Příloha D – Simulační schéma šestistupňového generátoru s odporovým děličem



Příloha E – Simulační schéma šestistupňového generátoru s kapacitním děličem

