

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A TECHNICKÉ EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Modelování generátoru vysokonapět'ových impulzů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Karel VEISHEIPL**
Osobní číslo: **E13N0088P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Modelování generátoru vysokonapěťových impulzů**
Zadávací 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 vysokonapěťovými generátory impulzního napětí.
2. Popište požadované parametry výstupního impulsu.
3. Studujte chování generátoru (tvar a velikost výstupního impulsu) v závislosti na velikosti a charakteru zátěže (induktivní, kapacitní, generátor naprázdno).
4. Poznatky získané modelováním publikujte ve formě jednotlivých "záznamů" tvaru výstupního impulsu a vypracujte grafy sledovaných závislostí.

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


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

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

V této diplomové práci je zpracována problematika impulzního generátoru vysokých napětí a požadovaných parametrů jeho výstupního napěťového impulzu. Dále byla vytvořena funkční simulační schémata, na kterých je ukázán vliv jednotlivých parametrů impulzního generátoru na výstupní napěťový impulz, a která mohou sloužit jako učební pomůcka. V této práci je pro simulační účely využit program LTspice.

Klíčová slova

vysokonapěťový impulzní generátor, atmosférické impulzní napětí, spínací impulz, simulace, LTspice, tvar impulzní napěťové vlny, doba do vrcholu, doba do půltýlu.

Abstract

The impulse generator of high voltages and its output voltage impulse parameters problematic is formulated in this diploma thesis. Simulation schemes were also created and they will be used to show an influence of impulse generator's single parameters on an output impulse voltage and they also can be used as an educational tool. Simulation software LTspice is used for all purposes of simulations in this thesis.

Key words

impulse generator of high voltage, lightning - impulse voltage, switching impulse, dielectric, simulation, LTspice, impulse voltage waveshape, peak time, time to half - value.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 5.5.2015

Karel Veisheipl

.....

Poděkování

Tímto bych rád upřímně poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Petrovi Martínkovi, Ph.D. a Prof. Ing. Rainerovi Hallerovi, Dr. za cenné profesionální rady během konzultací, odborné připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	1
SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ	2
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	3
ÚVOD	5
1 IMPULZNÍ GENERÁTORY OBECNĚ	6
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ IMPULZNÍCH GENERÁTORŮ	6
1.2 ZÁKLADNÍ PRINCIP IMPULZNÍHO GENERÁTORU NAPĚTÍ	6
2 IMPULZNÍ NAPĚTÍ	7
2.1 ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ	10
2.2 SPÍNACÍ IMPULZ	10
2.3 TOLERANCE A NEJISTOTY IMPULZNÍHO NAPĚTÍ	11
3 OBVODY IMPULZNÍCH GENERÁTORŮ	12
3.1 OBVODY JEDNOSTUPŇOVÝCH GENERÁTORŮ	13
3.2 VÝPOČET ÚČINNOSTI JEDNOSTUPŇOVÉHO GENERÁTORU	14
3.3 VÝPOČET ODPORŮ JEDNOSTUPŇOVÉHO GENERÁTORU	19
3.4 OBVOD VÍCESTUPŇOVÉHO IMPULZNÍHO GENERÁTORU	22
4 SIMULACE IMPULZNÍCH GENERÁTORŮ	25
4.1 JEDNOSTUPŇOVÉ IMPULZNÍ GENERÁTORY	25
4.2 VÍCESTUPŇOVÉ IMPULZNÍ GENERÁTORY	29
4.3 NASTAVENÍ PROMĚNNÉ HODNOTY V LTSPICE	32
4.4 VLIV KAPACITNÍ ZÁTĚŽE NA VÝSTUPNÍ VLNU GENERÁTORU	33
4.5 MODIFIKACE ZAPOJENÍ VÍCESTUPŇOVÉHO GENERÁTORU	35
4.6 VLIV INDUKČNOSTI GENERÁTORU NA VÝSTUPNÍ IMPULZ	37
ZÁVĚR	39
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	40
PŘÍLOHY	I
PŘÍLOHA A – SIMULAČNÍ SCHÉMA OSMISTUPŇOVÉHO GENERÁTORU	I
PŘÍLOHA B – SIMULAČNÍ SCHÉMA ČTYŘSTUPŇOVÉHO GENERÁTORU	II
PŘÍLOHA C – SIMULAČNÍ SCHÉMA DVOUSTUPŇOVÉHO GENERÁTORU	III
PŘÍLOHA D – VLIV KAPACITNÍ ZÁTĚŽE NA VÝSTUPNÍ IMPULZ GENERÁTORU	IV
PŘÍLOHA D – VLIV INDUKČNOSTI GENERÁTORU NA VÝSTUPNÍ IMPULZ	V

Seznam obrázků, tabulek a grafů

OBRÁZEK 1	SCHÉMA IMPULZNÍHO GENERÁTORU NAPĚTÍ.....	7
OBRÁZEK 2	PLNÝ ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ (A), ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ USEKNUTÝ V TÝLU (B), ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ USEKNUTÝ V ČELE (C); T_1 DOBA ČELA, T_2 DOBA PŮLTÝLU, T_C DOBA DO USEKNUTÍ VLNY, O_1 ZDÁNlivÝ POČÁTEK	9
OBRÁZEK 3	SPÍNACÍ IMPULZ	11
OBRÁZEK 4	VARIANTY OBVODU JEDNOSTUPŇOVÉHO IMPULZNÍHO GENERÁTORU	13
OBRÁZEK 5	LAPLACEŮV TRANSFORMAČNÍ OBVOD.....	14
OBRÁZEK 6	SLOŽKY IMPULZNÍHO NAPĚTÍ PODLE OBVODŮ NA OBRÁZKU 4.....	16
OBRÁZEK 7	ÚČINNOST JEDNOSTUPŇOVÝCH IMPULZNÍCH GENERÁTORŮ.....	19
OBRÁZEK 8	SCHÉMATA IMPULZNÍHO GENERÁTORU PRO URČENÍ LIMITNÍ HODNOTY ČELNÍHO ODPORU.....	21
OBRÁZEK 9	SCHÉMA ŠESTISTUPŇOVÉHO GENERÁTORU V MARXOVĚ ZAPOJENÍ.....	23
OBRÁZEK 10	VÍCESTUPŇOVÝ GENERÁTOR S ROZPROSTŘENÝM ČELNÍM ODPOREM	24
OBRÁZEK 11	SCHÉMA JEDNOSTUPŇOVÉHO IMPULZNÍHO GENERÁTORU V LTSPICE PODLE SCHÉMATU NA OBRÁZKU 4 (B)	25
OBRÁZEK 12	VÝSTUPNÍ IMPULZ JEDNOSTUPŇOVÉHO GENERÁTORU Z OBRÁZKU 10	26
OBRÁZEK 13	SCHÉMA JEDNOSTUPŇOVÉHO IMPULZNÍHO GENERÁTORU V LTSPICE PODLE SCHÉMATU NA OBRÁZKU 4 (A)	26
OBRÁZEK 14	VÝSTUPNÍ IMPULZ JEDNOSTUPŇOVÉHO GENERÁTORU Z OBRÁZKU 12	27
OBRÁZEK 15	DETAIL NABÍJECÍHO STUPNĚ VÍCESTUPŇOVÉHO IMPULZNÍHO GENERÁTORU ...	30
OBRÁZEK 16	VÝSTUPNÍ NAPĚTÍ VÍCESTUPŇOVÉHO IMPULZNÍHO GENERÁTORU	31
OBRÁZEK 17	PROMĚNNÁ HODNOTA KOMPONENTU V LTSPICE A), VLOŽENÍ SPICE DIRECTIVE B), NASTAVENÍ SPICE DIRECTIVE C), UMÍSTĚNÍ PŘÍKAZŮ NA PRACOVNÍ PLOCHU D)	32
OBRÁZEK 18	Vliv KAPACITNÍ ZÁTĚŽE NA TVAR VÝSTUPNÍ VLNY.....	33
OBRÁZEK 19	MODIFIKACE OSMISTUPŇOVÉHO ZAPOJENÍ IMPULZNÍHO GENERÁTORU NA ČTYŘSTUPŇOVÉ ZAPOJENÍ	35
OBRÁZEK 20	MODIFIKACE OSMISTUPŇOVÉHO ZAPOJENÍ IMPULZNÍHO GENERÁTORU NA DVOUSTUPŇOVÉ ZAPOJENÍ	36
OBRÁZEK 21	NAPĚŤOVÝ IMPULZ REÁLNÉHO GENERÁTORU.....	37
OBRÁZEK 22	RÁZOVÝ GENERÁTOR S VLOŽENOU INDUKČNOSTÍ	37
OBRÁZEK 23	Vliv INDUKČNOSTI GENERÁTORU NA TVAR VÝSTUPNÍ VLNY.....	38
TABULKA 1	HODNOTY ČASOVÝCH KONSTANT PRO VYBRANÉ IMPULZNÍ VLNY.....	20
TABULKA 2	VÝPOČET ÚČINNOSTI GENERÁTORU NA OBRÁZKU 11	28
TABULKA 3	VÝPOČET ÚČINNOSTI GENERÁTORU NA OBRÁZKU 13	28
TABULKA 4	HODNOTY PRO VÝPOČET ÚČINNOSTI OSMISTUPŇOVÉHO GENERÁTORU V ZÁVISLOSTI NA ZATĚŽOVACÍ KAPACITĚ	34
GRAF 1	POROVNÁNÍ ÚČINNOSTI GENERÁTORŮ NA OBRÁZCÍCH 11 A 13	30
GRAF 2	ÚČINNOST GENERÁTORU V ZÁVISLOSTI NA ZATĚŽOVACÍ KAPACITĚ.....	34

Seznam použitých symbolů a zkratek

a, b	substituční koeficienty pro výpočet výstupního napětí
C_1	činná kapacita
C_2	zatěžovací kapacita
C'	rozptylová kapacita způsobená elektrickým polem mezi přilehlými stupni generátoru
C'_1	dílčí kapacita vícestupňového generátoru
C''	rozptylová kapacita jiskřiště
C'''	rozptylová kapacita stejně jako C' , ale vznikající na dvou stupních
k	substituční koeficient pro výpočet výstupního napětí
L	celková indukčnost obvodu
L_1, L_2	dílčí indukčnost jednotlivých větví obvodu
O_1	zdánlivý počátek
R	kritický odpor jednoduchého ekvivalentního sériového obvodu
R_1	čelní odpor
R_2	týlní odpor
R'	nabíjecí odpor vícestupňového generátoru
R'_1	rozprostřený odpor u vícestupňového generátoru
R'_2	rozprostřený vybíjecí odpor u vícestupňového generátoru
R''_1	externí rezistor pro tlumení oscilací
t	čas
T_1	doba čela
T_2	doba půltýlu
T_c	doba do useknutí vlny
T_d	časový interval na 90 % maximální hodnoty spínacího impulzu
T_p	časový interval mezi skutečným počátkem a okamžikem dosažení maximální hodnoty spínacího impulzu
U_0	nabíjecí napětí
U_p	vrcholová hodnota výstupního napětí
$U(s)$	výstupní napětí Laplaceova transformačního obvodu
$U(t)$	výstupní napětí generátoru v závislosti na čase

W	energie generátoru v závislosti na C_1
Z_1, Z_2	impedance větví obvodu použita pro výpočet výstupního napětí
α_1, α_2	kořeny substituované rovnice pro výpočet $U(s)$

Úvod

Dříve rázový generátor, který je dnes nazýván impulzním generátorem, je elektrické zařízení sloužící pro generování poměrně rychlých impulzů, a to napět'ových či proudových, z čehož se také odvíjí dělení těchto generátorů na napět'ové impulzní generátory a proudové impulzní generátory.

Impulzy vytvořené pomocí těchto generátorů mají své charakteristické tvary, jsou totiž vytvořené tak, aby simulovaly například úder blesku či spínací impulz vznikající na elektrickém vedení a jsou tedy zároveň schopné dosahovat u těchto impulzů velmi vysokých maximálních hodnot. Právě tyto vlastnosti umožňují impulzním generátorům, aby byly využívány v laboratořích, kde slouží k testování odolnosti vodičů napětí, pevnosti dielektrických materiálů pevného, plynného i kapalného skupenství a různých elektrických zařízení, jako mohou být například vysokonapět'ové izolátory, pojistky, transformátorové průchodky a podobně.

Impulzní generátory jsou založeny na principu napět'ových násobičů, kterým se podrobně zabýval maďarský fyzik Ányos Jedlik, který také jako první představil roku 1868 kondenzátorový kaskádní násobič napětí, na jehož základech pak nastínil princip proudového generátoru využívajícího toto kaskádní zapojení. Jednou z modifikovaných forem takového kaskádního násobiče napětí je i zapojení Erwina Otto Marxe, které bylo veřejnosti představeno roku 1924, a které je dnes známo jako vysokonapět'ový impulzní generátor. Využívá postupného nabíjení jednotlivých kapacitních stupňů v paralelním zapojení a jejich následného vybíjení v sériovém spojení. Z tohoto zapojení pak vychází většina moderních impulzních generátorů [4].

Cílem této diplomové práce je vytvořit funkční simulační obvod takového vysokonapět'ového impulzního generátoru, aby bylo možné jednoduše a rychle posuzovat vliv jednotlivých parametrů na tvar výstupního impulzu. V této práci tedy budou popsána vytvořená simulační schémata jednostupňových a vícestupňových impulzních generátorů vysokého napětí a zároveň zde budou zobrazeny výstupní impulzy v závislosti na různých parametrech, které mají znatelný vliv na výstupní impulz generátoru.

1 Impulzní generátory obecně

Impulzní neboli rázové generátory, sloužící pro vytváření impulzních vln, nacházejí uplatnění především v laboratořích vysokého napětí, kde slouží díky své schopnosti dosáhnout velmi vysokých maximálních hodnot napěťových či proudových impulzů v krátkých časových intervalech pro testování zařízení za podmínek, které nejsou jinak běžně dosažitelné.

1.1 Základní rozdělení impulzních generátorů

Impulzní generátory mohou vytvářet napěťové nebo proudové impulzní vlny, z čehož vychází jejich nejzákladnější dělení:

- impulzní generátory napěťové vlny,
- impulzní generátory proudové vlny,
- impulzní generátory proudové i napěťové vlny [2].

Napěťové impulzní generátory se nejčastěji používají k testování vysokonapěťové izolace zařízení a proudové generátory k testování vysoko - proudých zařízení a součástek. Generátory třetí skupiny jsou pak kombinací předešlých a jsou finančně nákladnější.

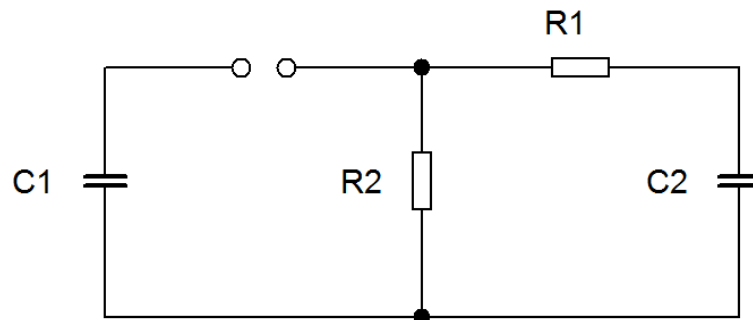
Impulzní generátory, či způsob jejich zapojení, je také možné třídit dle počtu zapojených stupňů, který lze určit podle počtu nabíjených kondenzátorů. Impulzní generátor může být například jednostupňový, čtyřstupňový nebo osmistupňový. Princip nabíjení kondenzátorů je pak popsán v části 1.2.

1.2 Základní princip impulzního generátoru napětí

Jednou z forem rázových generátorů je takzvaný Marxův generátor, který se obecně skládá z několika kondenzátorů, které jsou v první fázi paralelně nabíjeny pomocí stejnosměrného zdroje. Takovýmto způsobem nabité kondenzátory jsou poté přepojeny do série a jsou tak pomocí jiskřišť vybity skrz testovaný objekt [4].

Proudové impulzní generátory se nabíjí obdobným způsobem. Obsahují tedy

opět několik kondenzátorů, které se paralelně nabíjí pomocí stejnosměrného zdroje, ale jsou vybíjeny paralelně přes odpory a indukčnosti do testovaného objektu.



Obrázek 1 Schéma impulzního generátoru napětí

Na obrázku 1 je zobrazeno základní schéma jednostupňového impulzního generátoru napětí. Výstupem takového obvodu je pak impulzní napět'ová vlna, kterou lze rozdělit na její čelo a tyl. Obvod se skládá z tzv. činné kapacity C_1 , která se nabije pomocí stejnosměrného zdroje a následně se vybije pomocí jiskřiště do obvodu složeného z čelního odporu R_1 , tylního odporu R_2 a zatěžovací kapacity C_2 . Zatěžovací kapacita společně s čelním odporem, přes který je při procesu nabíjena, tvarují čelo impulzní vlny. Průběh tylu je pak určen především napětím vytvořeným vybíjecím proudem činné kapacity na tylním odporu.

Zapojení impulzního generátoru vyznačeného na obrázku 1 se však v praxi většinou nepoužívá z jednoho prostého důvodu, a sice že maximální hodnota takto vytvořeného napět'ového impulsu je omezená nabíjecím napětím zdroje. Pokud je tedy potřeba dosahovat vyšších hodnot napětí, je potřeba místo jednostupňového rázového generátoru použít generátor vícešupňový.

2 Impulzní napětí

Rušení v elektrických distribučních a přenosových sítích jsou velmi často způsobena dvěma druhy přechodných napětí, jejichž amplitudy mohou výrazně překročit vrcholové hodnoty běžných provozních střídavých napětí [3].

Prvním druhem takového napětí jsou přepětí způsobená úderem blesku, který například může zasáhnout fázový vodič venkovního vedení, k čemuž by běžně

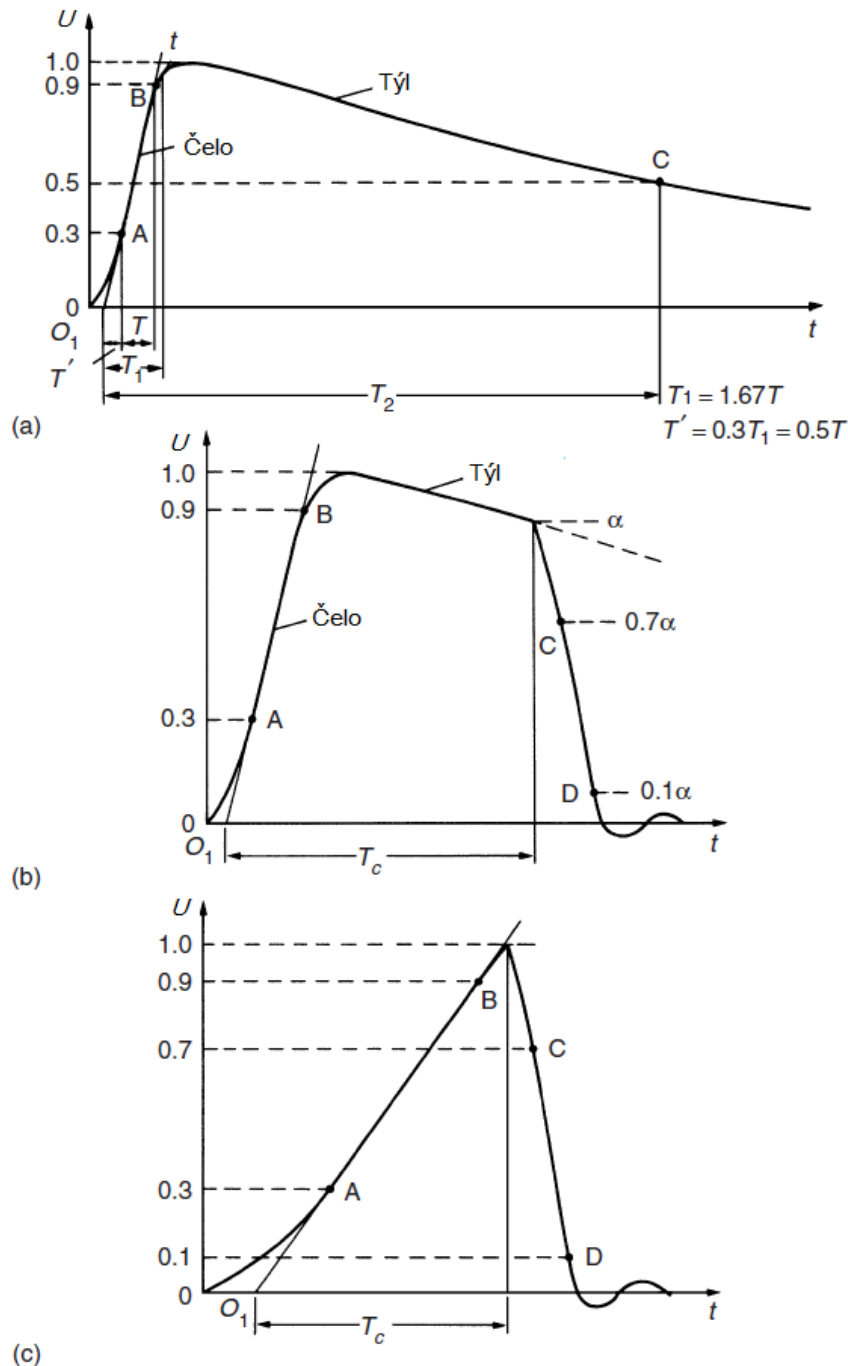
nemělo docházet, nebo přípojnice venkovních rozveden. Vzhledem k tomu, že každý takovýto úder může způsobit průchod proudů v řádech až okolo 100 kA a napětí 1000 kV i více, lze říci, že amplitudy takovýchto průběhů jsou oproti běžným provozním hodnotám skutečně velmi vysoké. Každý úder blesku je pak následován vlnami šířícími se po vedení, jejichž amplituda je často limitována maximální izolační pevností daného venkovního vedení. Rychlost nárůstu napětí takovéto šířící se vlny je díky jejímu původu přímo úměrná strmosti atmosférického proudu, který může překonat i strmost 100 kA/ μ s a úroveň napětí pak může být snadno spočtena daným proudem vynásobeným efektivní vlnovou impedancí daného vedení. V případě, že vznikne příliš vysoká úroveň napětí, dojde vlivem průrazu izolace k jejímu přerušení, a proto mohou šířící se vlny se strmým čelem a dokonce ještě strmějším týlem vysoce namáhat izolaci transformátorů nebo dalších vysokonapětových zařízení. Systémy ochrany proti úderům blesku, jako jsou například bleskojistky a ostatní zařízení způsobující ztráty, mohou šířící se vlny různě tlumit a deformovat, díky čemuž se v přenosové síti mohou vyskytnout atmosférická přepětí s velmi odlišnými tvary napětové vlny [3].

Další druh vyskytujících se přechodných napětí je způsobován spínacími jevy. Jejich amplitudy jsou vždy závislé na provozním napětí a tvar je ovlivněn impedancemi systému stejně jako spínacími podmínkami. Rychlost napětového nárůstu je obvykle pomalejší, ale je známo, že tvar této vlny může být velmi nebezpečný pro různé izolační systémy a obzvláště pak pro systémy v přenosových soustavách s napětím vyšším než 245 kV, které používají jako izolaci atmosférický vzduch [3].

Oba tyto druhy přepětí se zároveň mohou vyskytovat v nízkonapětových distribučních sítích, kde jsou obvykle způsobovány přítomnými spínači, případně přenesena z vysokonapětové distribuční sítě. Vzhledem k tomu, že jejich amplitudy zde dosahují i několika kV, mohou způsobit průraz elektronických zařízení, a proto je v dnešní době běžné, že se nízkonapětová zařízení testují i z hlediska vlivu přechodných napětí či proudů [3].

Ačkoliv je skutečný tvar obou druhů přepětí velmi závislý na nejrůznějších okolnostech a může se tedy lišit, stalo se kvůli testovacím účelům nezbytným simulovat tato přepětí relativně jednoduchými prostředky. Mnohé národní a mezinárodní normy definují impulzní napětí jako jednosměrné napětí, které stoupá více či méně rychle k vrcholové hodnotě a poté klesá relativně pomalu k nule. V normě IEC Standard 60,

která je dnes mezinárodními výbory přijímána, je zmíněn rozdíl mezi atmosférickými a spínacími impulzy, což znamená rozdělení podle původu přechodového děje. Impulzní napětí s dobou trvání čela mezi jednotkami až desítkami μs jsou většinou považována za atmosférické impulzy [3].



Obrázek 2 Plný atmosférický impulz (a), atmosférický impulz useknutý v týlu (b), atmosférický impulz useknutý v čele (c); T_1 doba čela, T_2 doba půltýlu, T_c doba do useknutí vlny, O_1 zdánlivý počátek

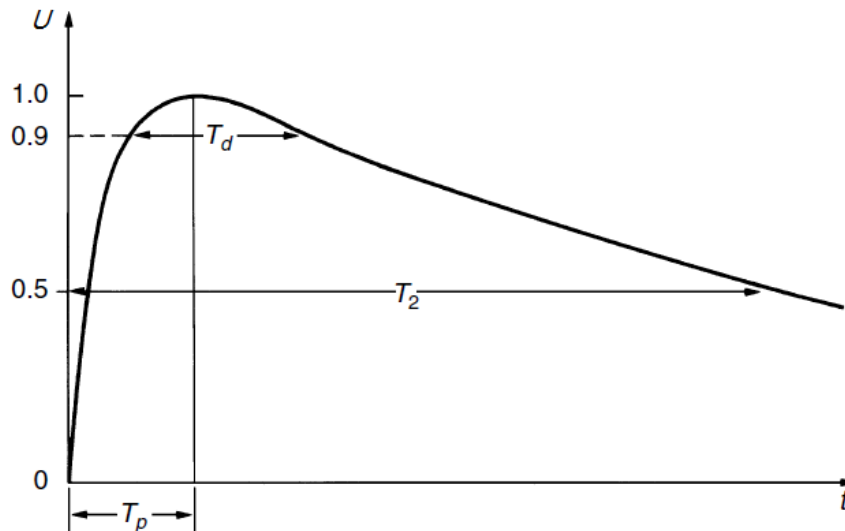
2.1 Atmosférický impulz

Na obrázku číslo 2 lze vidět „plný“ tvar vlny (a) atmosférického impulzního napětí a zároveň i stejnou napětíovou vlnu, ale tentokrát useknutou v týlu vlny (b) a v čele vlny (c) vlivem průrazného výboje. Ačkoliv jsou definice pro takové impulzy jasně uvedeny, mělo by být zdůrazněno, že za zdánlivý počátek vlny se považuje místo, kde přímka procházející body A a B protíná časovou osu. Doba trvání čela vlny T_1 je opět zdánlivý parametr, který je definován jako $1,67 \times T$ mezi hodnotami, kdy impulz nabývá 30 % a 90 % vrcholové hodnoty plného nebo useknutého impulzu [3].

Pro impulzy useknuté v čele je doba do useknutí T_c zhruba stejná jako T_1 . Důvod, proč je bod A definován na úrovni 30 % z vrcholové hodnoty, lze pozorovat ve většině záznamů měřených impulzních napětí. Je poměrně složité získat hladký sklon během prvních nárůstů napětí vzhledem k tomu, že měřicí systém, stejně jako rozptylové kapacity a indukčnosti, mohou způsobovat oscilace. Pro většinu aplikací takových impulzů se používá jako doba čela $T_1 = 1.2 \mu\text{s}$ a doba pultýlu $T_2 = 50 \mu\text{s}$. Obecně se pak připouští tolerance až $\pm 30 \%$ pro T_1 a $\pm 20 \%$ pro T_2 . Tato impulzní napětí jsou označována jako T_1/T_2 impulz, a proto je dnes impulz $1,2/50 \mu\text{s}$ uznávaný standard pro atmosférické impulzní napětí. Z těchto důvodů trvají atmosférické impulzy pouze velmi krátké časy, obzvláště pak pokud jsou useknuté při náběhu. Kvůli vlastním chybám měření a nejistotách při vyhodnocování časových parametrů T_1 , T_2 a T_c nebo obzvláště časového rozdílu mezi body C a D, mohou být jen těžko vyčísleny s vysokou přesností [3].

2.2 Spínací impulz

Na obrázku 3 je zobrazen spínací impulz, jehož doba týlu T_2 je definována obdobně jako u atmosférického impulzu, ale doba čela T_p je dána jako časový interval mezi skutečným počátkem a okamžikem, kdy napětí dosáhlo své maximální hodnoty. Stanovit ovšem maximální hodnotu s vysokou přesností může být velmi obtížné, a proto je zde uváděn parametr T_d , což je časový interval na 90 % maximální hodnoty. Rozdíl v porovnání atmosférického a spínacího impulzu je na první pohled zřejmý, obzvláště při srovnání časových měřítek. Standardní spínací impulz má časové parametry $T_p = 250 \mu\text{s} \pm 20 \%$ a $T_2 = 2500 \mu\text{s} \pm 60 \%$, což znamená, že je popisován jako $250/2500 \mu\text{s}$ impulz [3].



Obrázek 3 Spínací impulz

2.3 Tolerance a nejistoty impulzního napětí

Během generování atmosférického impulzního napětí jsou pro vysokonapět'ový impulzní generátor přípustné určité odchylky od normou stanovených hodnot. Tyto povolené tolerance jsou následující:

- $\pm 3 \%$ pro úroveň zkušebního napětí,
- $\pm 30 \%$ pro dobu čela T_1 ,
- $\pm 20 \%$ pro dobu půltýlu T_2 .

Důvody pro takto vysoké tolerance u časových parametrů impulzního napětí jsou dány různorodou interakcí mezi obvodem generátoru a testovaným objektem, jehož parametry mohou být velmi rozličné. Na základě této vazby jsou pak časové parametry ovlivňovány více či méně. Díky těmto tolerancím se pak nemusí měnit parametry či celé prvky generátoru pokaždé, kdy se lehce změní testovaný objekt. Pro dobu do useknutí vlny T_c pak není stanovena žádná toleranční odchylka [2].

Během zkoušek impulzním napětím na vysokonapět'ovém zařízení podle daných specifikací by měla být hodnota testovacího napětí a časové parametry stanoveny v rozsahu předepsaných mezních hodnot rozšířené nejistoty, které jsou dány stejně pro pozitivní i negativní polaritu napětí jako:

- 3 % pro hodnoty testovacího napětí plného a useknutého atmosférického impulzu s dobou do useknutí $T_c \geq 2 \mu\text{s}$,
- 5 % pro hodnoty testovacího napětí useknutého atmosférického impulzu useknutého v čele s dobou do useknutí $0,5 \mu\text{s} \leq T_c \leq 2 \mu\text{s}$,
- 10 % pro časové parametry.

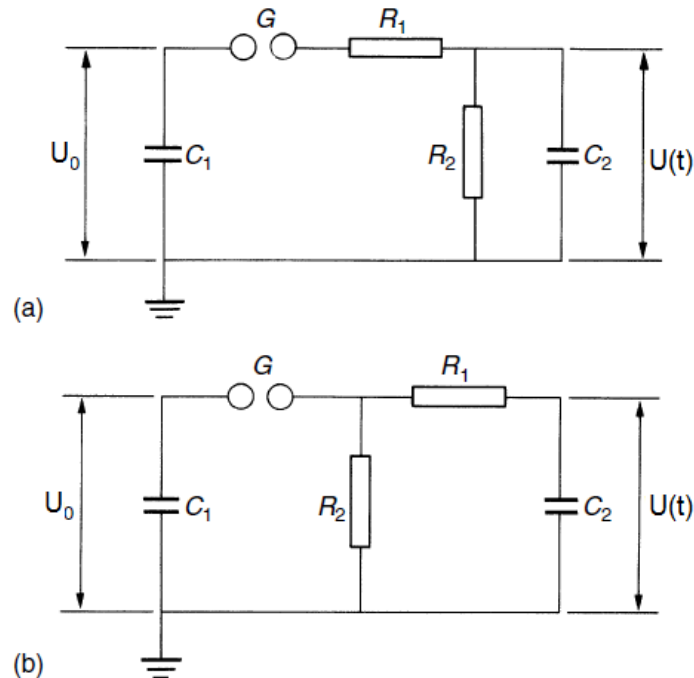
Dalším parametrem je rozšířená nejistota, která charakterizuje rozsah hodnot, které leží nad a pod naměřenými výsledky, což se za daných podmínek považuje za možné, pokud je celková pravděpodobnost, že hodnota bude ve správném pásmu a ne mimo něj, přibližně 95 %. Nejistota parametrů impulzního napětí, které se přivádí na testovaný objekt, se skládá z nejistoty měřicího systému, která je uvedena v kalibračním certifikátu pro dané měřítko, z nejistoty časových parametrů a dalších příspěvků k nejistotám vznikajících během testování impulzním napětím. Během měření by tedy měli být brány v úvahu podmínky, které se během něj vyskytují, protože se nemusí shodovat s těmi, které byly při kalibraci. Je tedy dobré vzít v potaz například změnu okolní teploty nebo odchylky způsobené měřicím systémem.

3 Obvody impulzních generátorů

Díky kapitole 2 je nyní zřejmé, jaké tvary impulzních průběhů jsou žádané. Vzhledem k tomu, že tvar atmosférických i spínacích průběhů lze poměrně přesně vytvořit superpozicí dvou exponenciálních průběhů, můžeme velmi rychlý nárůst a pomalý pokles impulzní vlny vytvořit pomocí nabíjení a vybíjení dvou energetických úložišť. Pomocí impulzních generátorů se obecně nejčastěji testují izolační systémy, které tedy budou tvořit zátěž generátoru, a které vykazují převážně kapacitní charakter. Z tohoto důvodu je tedy nutné zahrnout tento příspěvek k uložené energii. Druhý zdroj energie může být tvořen indukčností nebo dalším kondenzátorem. Převážně pro atmosférické impulzy je rychlé vybití čisté indukčnosti nemožné, protože vysokonapětové tlumivky s vysokým obsahem energie nemohou být nikdy vyrobeny bez znatelných rozptylových kapacit. Proto se rychlé vybíjecí obvody téměř vždy skládají v podstatě ze dvou kondenzátorů [3].

3.1 Obvody jednostupňových generátorů

Na obrázku 4 jsou zobrazeny dva základní obvody pro jednostupňové impulzní generátory.



Obrázek 4 Varianty obvodu jednostupňového impulzního generátoru

Kondenzátor C_1 je pomalu nabíjen ze stejnosměrného zdroje, dokud na jiskřišti G nedojde k přeskoku, čímž v podstatě sepne. Toto jiskřiště se tedy chová jako napět'ově citlivý a napětí omezující spínač, jehož doba zapálení, což je doba do přeskoku, je v porovnání s T_1 velmi krátká. Vzhledem k tomu, že se impulzní generátory používají pro generování napět'ových impulzů od jednotek kV až zhruba do jednoho MV, používá se nejčastěji kulové jiskřiště. Existuje ovšem určitý ekonomický limit pro nabíjecí napětí U_0 , kdy hodnota tohoto napětí by se měla pohybovat zhruba do 250 kV. Pokud by byly tyto limity překročeny, znamenalo by to, že by byly zapotřebí kulové elektrody s příliš velkým průměrem, aby se zabránilo nadměrným nehomogenním polím mezi elektrodami kulového jiskřiště. Rezistory R_1 , R_2 a kondenzátor C_2 se podílí na tvarování vlny. R_1 primárně tlumí průběh a určuje dobu čela T_1 . R_2 slouží k vybíjení kondenzátorů a tím tedy k určení tílu vlny. Kondenzátor C_2 reprezentuje plnou zátěž, to znamená objekt, který je momentálně testován, a všechny ostatní kapacitní elementy, které jsou k testovacímu objektu řazeny paralelně

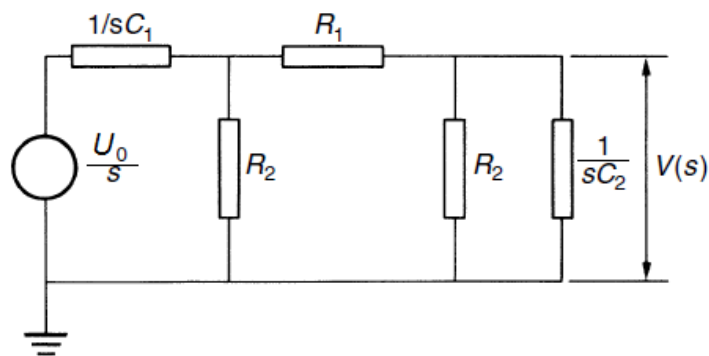
(měřicí zařízení, přídavný zatěžovací kondenzátor k zabránění velkých odlišností T_1/T_2 při změně testovaného objektu). Prozatím nejsou zahrnuty žádné indukčnosti, které byly pro první základní analýzy zanedbány, neboť nejsou nezbytné k pochopení víceúrovňových generátorů. Toto zjednodušení je však přípustné, neboť obecně se indukčnost generátorů udržuje tak malá, jak je to jen možné [3].

Nejspíše nejvýznamnějším parametrem impulzních generátorů je jejich maximální uložená energie v jeho činné kapacitě C_1 , kterou je poté možno z generátoru získat a platí pro ni následující vztah

$$W = \frac{1}{2} C_1 (U_{0max})^2. \quad (3.1)$$

Vzhledem k tomu, že C_1 je vždy mnohem větší než C_2 , je toto parametr, který ovlivňuje celkovou cenu generátoru nejvíce.

Pro analýzu jednostupňového rázového generátoru lze použít schéma na obrázku 5, které simuluje podmínky, kdy pro $t \leq 0$ je kondenzátor C_1 nabitý na U_0 a pro $t > 0$ je tento kondenzátor přímo připojený k síti tvarující výstupní impulzní vlnu generátoru [3].



Obrázek 5 Laplaceův transformační obvod

3.2 Výpočet účinnosti jednostupňového generátoru

Pro schéma na obrázku 4 (a) je výstupní napětí generátoru dáno, vezmeme-li v potaz Laplaceův transformační obvod na obrázku 5, jako

$$U(s) = \frac{U_0}{s} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (3.2)$$

kde pro Z_1 a Z_2 platí

$$Z_1 = \frac{1}{sC_1} + R_1, \quad (3.3)$$

$$Z_2 = \frac{\frac{R_2}{sC_2}}{R_2 + \frac{1}{sC_2}}. \quad (3.4)$$

Dosadíme-li rovnice 3.3 a 3.4 do 3.2 a provedeme substituci, získáme pak následující vztah

$$U(s) = \frac{U_0}{k} \frac{1}{s^2 + as + b}, \quad (3.5)$$

kde pro koeficienty a , b , k platí

$$a = \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} \right), \quad (3.6)$$

$$b = \left(\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right), \quad (3.7)$$

$$k = R_1 C_2. \quad (3.8)$$

Pro schéma na obrázku 4 (b) lze odvodit stejné vztahy včetně koeficientů b , k , avšak koeficient a bude odlišný, a to následujícím způsobem.

$$a = \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \right). \quad (3.9)$$

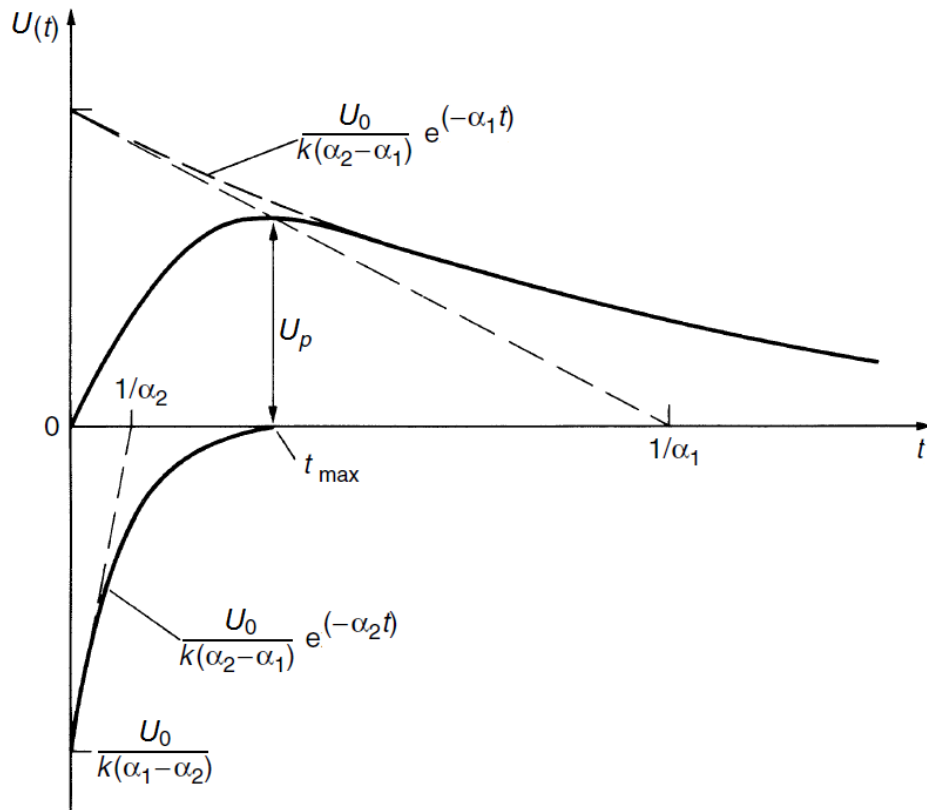
Pro oba tyto obvody pak tudíž pomocí Laplaceova transformačního slovníku získáme v časové oblasti stejný výraz pro napětí

$$U(t) = \frac{U_0}{k} \frac{1}{(\alpha_1 - \alpha_2)} [e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}], \quad (3.10)$$

kde α_1 a α_2 jsou kořeny rovnice $s^2 + as + b = 0$, která se vyskytuje ve jmenovateli rovnice (3.5), nebo-li

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b}. \quad (3.11)$$

Z těchto rovnic lze vidět, že výstupní napětí generátoru $U(t)$ je tedy tvořeno superpozicí dvou exponenciálních funkcí s odlišným znaménkem. Z rovnice (3.11) je patrné, že záporný kořen $1/\alpha_1$ vede k delší časové konstantě než pozitivní kořen $1/\alpha_2$. Graf pro rovnici (3.10) je zobrazen na obrázku 6 a v porovnání s obrázky 2 a 3, na kterých jsou zobrazeny spínací a atmosférické impulzy, lze konstatovat, že je těmito obvody možné generovat oba typy impulzních napětí [3].



Obrázek 6 Složky impulzního napětí podle obvodů na obrázku 4

Na první pohled jsou oba obvody na obrázku 4 totožné. Rozdíl mezi nimi je však patrný z hlediska jejich napětové účinnosti η , která je definována jako

$$\eta = \frac{U_p}{U_0}, \quad (3.12)$$

kde U_p je vrcholová hodnota výstupního napětí (jak je vyznačeno na obrázku 6). Tato hodnota je pak vždy menší než 100 % či 1. U_p lze stanovit pomocí určení t_{max} z rovnice $dU(t)/dt = 0$. Tento čas udávající vzrůst napětí na jeho vrcholovou hodnotu je dán jako

$$t_{max} = \frac{\ln\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)}{(\alpha_2 - \alpha_1)}. \quad (3.13)$$

Dosazením této rovnice do (3.10) získáme následující vztah pro účinnost generátoru

$$\eta = \frac{\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)^{-\left[\frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}\right]} - \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)^{-\left[\frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1}\right]}}{k(\alpha_2 - \alpha_1)}. \quad (3.14)$$

Rozdíly v účinnosti jsou způsobovány hodnotou $k = R_1 C_2$, a to pro oba obvody. Nejdříve bude tato účinnost určena pro obvod na obrázku 4 (b), který ji bude mít vždy větší pro daný poměr C_2/C_1 , protože během vybíjení netvoří rezistory R_1 a R_2 napětový dělič. Požadovaná část $R_1 C_2$ může být pomocí úpravy vzorce (3.11)

$$\alpha_1 \alpha_2 = b, \quad (3.15)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = a. \quad (3.16)$$

A následně dosazením za a a b z výrazů 3.7, 3.8 a 3.9

$$k = R_1 C_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_1 \alpha_2} \right) \left[1 - \sqrt{1 - 4 \frac{\alpha_2 \alpha_1}{(\alpha_2 + \alpha_1)^2} \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right)} \right]. \quad (3.17)$$

Pro $C_2 \leq C_1$, což je ve všech praktických případech splněno, a $\alpha_1 \gg \alpha_2$ u všech

normalizovaných tvarů impulzní vlny, lze rovnici zjednodušit do tvaru

$$k \cong \frac{1 + \frac{C_2}{C_1}}{(\alpha_2 + \alpha_1)}. \quad (3.18)$$

Dosazením tohoto výrazu do rovnice (3.14) a opětovným uvážením nerovnosti $\alpha_2 \gg \alpha_1$ dostáváme konečně účinnost ve tvaru

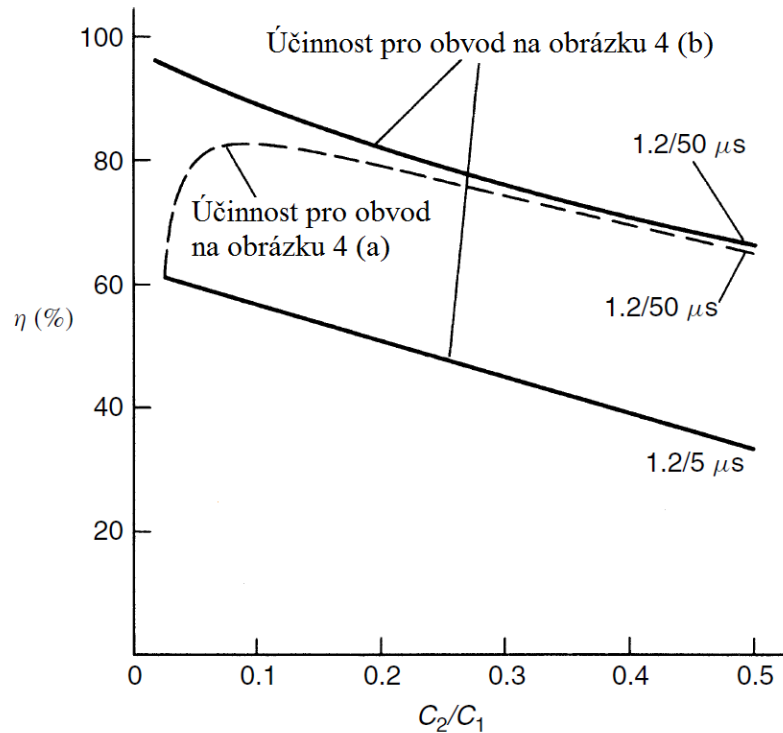
$$\eta = \frac{C_1}{(C_1 + C_2)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{C_2}{C_1}\right)}. \quad (3.19)$$

Napěťová účinnost tohoto generátoru bude spojitě stoupat, pokud C_2/C_1 bude klesat k nule. Tato rovnice pak vysvětluje, proč by měla být kapacita C_1 vždy mnohem větší než kapacita C_2 [3].

Napěťovou účinnost pro obvod 4 (a) již nelze získat stejným postupem jako pro obvod 4 (b). Pokud bychom dosadili (3.11) do rovnice (3.14), vzali v potaz poměr $R_1/R_2 = f(C_2/C_1)$, který prudce stoupá s klesajícím C_2/C_1 a nerovnost $\alpha_2 \gg \alpha_1$, získali bychom pomocí postupných úprav následující vztah pro účinnost

$$\eta = \frac{C_1}{(C_1 + C_2)} \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} = \frac{1}{1 + \left(\frac{C_2}{C_1}\right)} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_1}{R_2}\right)}. \quad (3.20)$$

V porovnání s účinností obvodu 4 (b) je patrné, že zde došlo ke snížení vlivem dalšího členu. Poměr R_1/R_2 je závislý na tvaru křivky a jednoduchá závislost na C_2/C_1 je zde tudíž nemožná. Pro impulz 1,2/50 μ s a obdobné napěťové impulzy vede nárůst R_1/R_2 ke snížení účinnosti pro $C_2/C_1 < 0,1$. Z tohoto důvodu prochází účinnost daného obvodu optimální hodnotou a snižuje se pro vysoké C_2/C_1 hodnoty stejně tak jako pro nízké [3].



Obrázek 7 Účinnost jednostupňových impulzních generátorů

V praxi se používají oba dva typy obvodu, nicméně většinou se používají upravené a v kombinaci. Pokud je odporový dělič připojen paralelně k testovacímu objektu, může jeho odpor přispět k vybíjení obvodu. Čelní odpor R_1 pak bývá často rozdělen, obzvláště pak u vícestupňových generátorů [3].

3.3 Výpočet odporů jednostupňového generátoru

U větších generátorů jsou vybíjecí kapacity vždy navrženy tak, aby byla účinnost generátoru v daném rozsahu C_2 co největší. Tato celková zatěžovací kapacita je tedy buď předem známa, případně může být snadno změřena. Neznámé hodnoty odporů pak mohou být vypočteny pomocí vztahů (3.15) a (3.16) a pomocí koeficientů a a b z rovnic (3.6) až (3.9), které jsou závislé na druhu obvodu. Získáme tedy následující vztahy:

pro obvod na obrázku 4 (a)

$$R_1 = \frac{1}{2C_1} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_2}} \right], \quad (3.21)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_2}} \right]. \quad (3.22)$$

pro obvod na obrázku 4 (b)

$$R_1 = \frac{1}{2C_2} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right], \quad (3.23)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right]. \quad (3.24)$$

Ačkoliv se ve všech těchto rovnicích vyskytují časové konstanty $1/\alpha_1$ a $1/\alpha_2$, které jsou závislé na tvaru impulzní vlny, není mezi nimi a časy T_1 , T_2 a T_p snadná vzájemná závislost. Může však být získána dosažením časových konstant do analytického řešení pro $U(t)$ z rovnice (3.10), čímž ale získáme iracionální vztah, který musí být řešen numericky [3]. Hodnoty pro některé vlny jsou uvedené v tabulce 1.

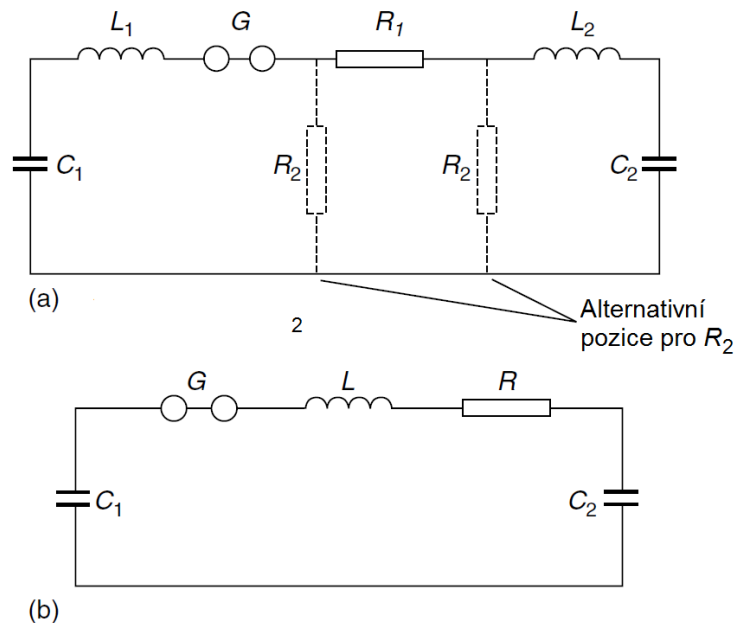
T_1/T_2 [μs]	$1/\alpha_1$ [μs]	$1/\alpha_2$ [μs]
1,2/50	68,2	0,405
1,2/200	284	0,381
250/2500	2877	104

Tabulka 1 Hodnoty časových konstant pro vybrané impulzní vlny

V praxi se ovšem žádaných hodnot T_1 a T_2 dosahuje těžko i s danou kapacitou C_1 , protože kapacita C_2 se bude kvůli zatěžovacímu objektu lišit a přesně vypočtené hodnoty pro R_1 a R_2 nebývají v praxi k dispozici. Z tohoto důvodu jsou nezbytné tolerance pro T_1 a T_2 , které zároveň přinesou toleranci pro hodnoty R_1 a R_2 [3].

U impulzních napětí se můžeme běžně setkat s překmitem na vrcholu vlny, případně s oscilacemi na vrcholu či na čele vlny. Počátek takovýchto jevů může být způsoben měřicí soustavou či indukčností každé větve obvodu stejně jako rozptylovou kapacitou. Tyto parametry pak narůstají s fyzickými rozměry obvodu [3].

Na obrázku 8 lze vidět dva obvody. Na prvním z obvodů (a) je znázorněna situace, kdy větvím vybíjecího obvodu přiřadíme indukčnost, což by vedlo k výpočtu výstupního napětí na kapacitě C_2 pomocí diferenciální rovnice druhého řádu. Nicméně takový obvod není přesný, protože zde nejsou brány v potaz rozptylové kapacity.



Obrázek 8 Schémata impulzního generátoru pro určení limitní hodnoty čelního odporu

Z tohoto důvodu je zde pak druhé schéma (b), kde L je celková indukčnost (složená z L_1 a L_2) mezi kapacitami C_1 a C_2 a dále je pak zanedbán týlní odpor, který by neměl podstatný vliv. Tímto získáme jednoduchý sériový rezonanční obvod, pro který snadno zjistíme kritický odpor $R = R_1$, aby nevznikaly oscilace pomocí vztahu

$$R_1 \cong R = 2 \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3.25)$$

kde

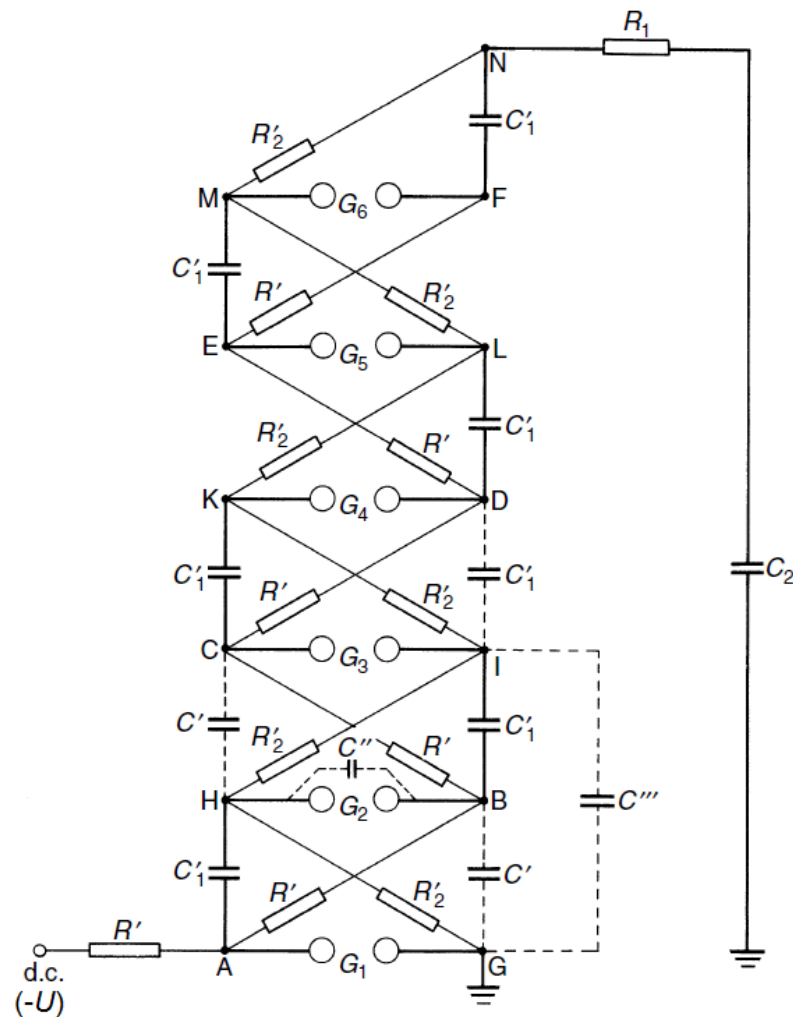
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}. \quad (3.26)$$

Tato rovnice je pak obecně vhodná pro odhadnutí limitních hodnot čelního odporu R_1 [3].

3.4 Obvod víceústupňového impulzního generátoru

Vzhledem k různým problémům při generování vysokých napětí, jako je například velikost a cena jiskřiště či fyzické rozměry generátoru samotného, jsou jednostupňové generátory téměř nepoužitelné. V roce 1923 vymyslel Marx uspořádání, ve kterém se tyto problémy nevyskytují. Jedná se o princip, kdy se několik kapacit nabije paralelně přes odpory a vybíjí se zapojeny do série pomocí jiskřišť. Na obrázku 9 je zobrazen takovýto šestistupňový generátor, což tedy znamená, že nabíjecích kapacit je zde řazeno šest [3].

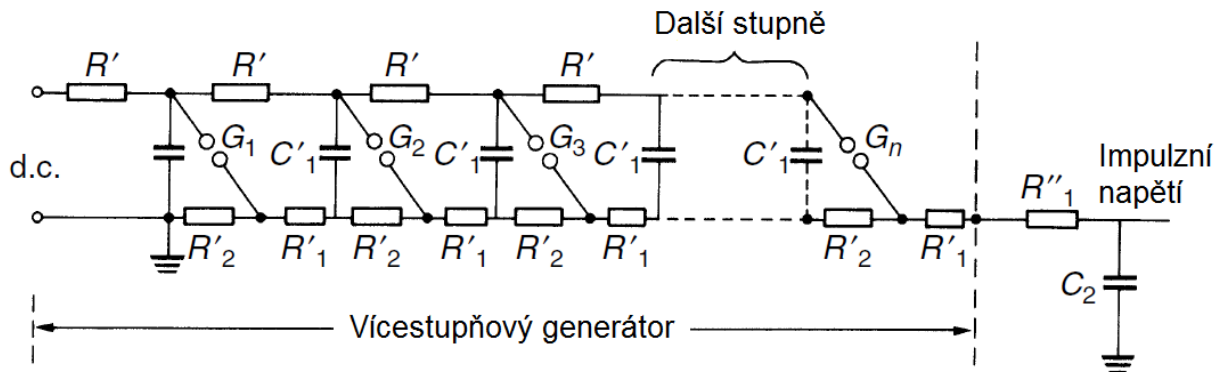
Kapacity C_1 o stejné hodnotě jsou přes nabíjecí odpory R_1 a vybíjecí (stejně tak tedy i nabíjecí) odpory R_2 paralelně nabity pomocí stejnosměrného zdroje. Po ukončení nabíjení, které v praxi trvá většinou několik sekund až 1 minutu, jsou body A, B, C, D, E a F na potenciálu stejnosměrného zdroje oproti zemi a body G, H, I, K, L, M a N zůstanou na potenciálu země. Vybití či zapálení generátoru je pak způsobeno přeskokem na nejnižším jiskřišti G_1 , který je následován téměř současnými přeskoky na všech zbývajících jiskřištích. Pokud jsou rozptylové kapacity, které jsou ve schématu naznačeny čárkovaně, zanedbány, jsou tyto po sobě rychle následující přeskoky způsobeny vysokým přepětím na druhém a vzdálenějších jiskřištích. Poté, co zapálí první jiskřiště, změní se rychle potenciál v bodě A z $-U$ na $U = 0$ V, a proto se v bodě H zvýší potenciál na $+U$.



Obrázek 9 Schéma šestistupňového generátoru v Marxově zapojení

Potenciál v bodě B však stále zůstal na své původní hodnotě nabíjecího potenciálu $-U$, což vede k tomu, že se na jiskřišti G_2 objeví rozdíl potenciálů $2U$. Toto poměrně vysoké přepětí vede k zapálení dalšího jiskřiště G_2 . To způsobí nárůst potenciálu v bodě I na $2U$ a pokud v bodě C zůstal nabíjecí potenciál, vznikne na jiskřišti G_3 rozdíl potenciálů $3U$. Toto názorné vysvětlení však není úplně správné. Potenciál v bodě B a C se totiž může vyrovnat na potenciál bodů A a B díky rezistorům R' , které se mezi nimi nachází. Je zde však zřejmé, že takovýto obvod vytváří napětí o opačné polaritě, než jakou je nabíjen. Na obrázku 9 jsou také zobrazeny rozptylové kapacity C'' , což je rozptylová kapacita jiskřiště, C' způsobených elektrickým polem mezi přilehlými stupni a C''' vznikajících stejně jako C' , ale na dvou stupních. Zároveň je zde čelní odpor R_1 umístěn pouze mezi generátor a zátěž. Takovýto samostatný, vně generátoru umístěný rezistor,

pak musí vydržet na krátkou dobu plné napětí z generátoru a bývá tudíž rozměrově rozsáhlý. Tato nevýhoda se dá eliminovat tak, že část, případně celý rezistor, se rozprostře uvnitř generátoru. Takové uspořádání je vidět na obrázku 10, kde je také navíc klasické sériové spojení činných kapacit C_1 a jiskřišť nahrazeno ekvivalentním uspořádáním, které má za následek, že polarita výstupního napětí je stejná jako polarita nabíjecího napětí [3].



Obrázek 10 Vícetupňový generátor s rozprostřeným čelním odporem

Nabíjecí odpory R' jsou vždy větší než rozprostřené odpory R'_1 a R'_2 . Přidání externího rezistoru R''_1 pomáhá utlumit oscilace, které jinak vznikají vlivem indukčnosti a kapacity externích vývodů mezi generátorem a zátěží, pokud jsou tyto vývody dlouhé. Celkem snadno může být také ukázáno, že tento obvod může být zjednodušen na jednostupňový generátor z obrázku 4 (b). Když dojde k zapálení generátoru, lze totiž celkovou činnou kapacitu C_1 spočítat jako

$$\frac{1}{C_1} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C'_{i1}}, \quad (3.27)$$

celkový čelní odpor R_1

$$R_1 = R''_1 + \sum_{i=1}^n R'_{i1}, \quad (3.28)$$

a celkový týlní odpor R_2 při zanedbání nabíjecích odporů R' jako

$$R_2 = nR'_{i2} = \sum_{i=1}^n R'_{i2}, \quad (3.29)$$

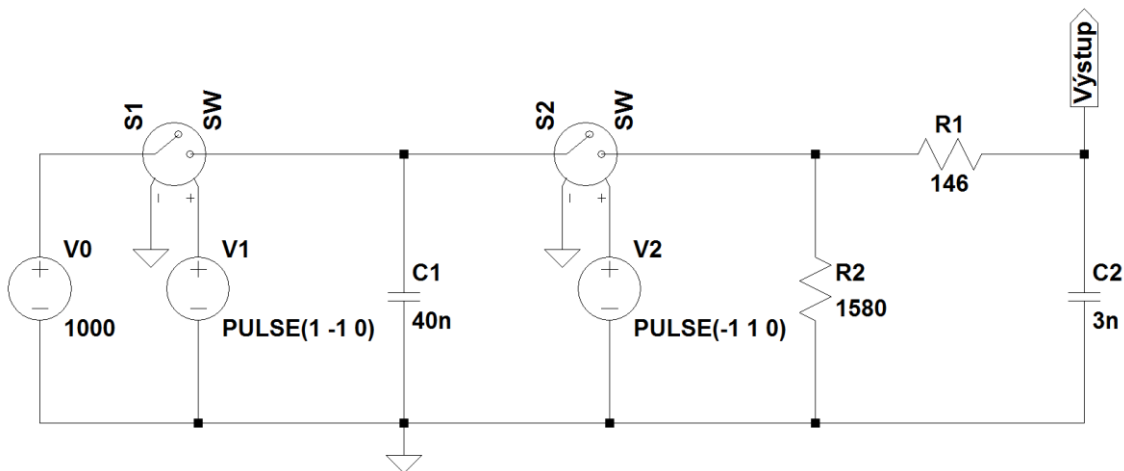
kde n je počet jednotlivých stupňů [3].

4 Simulace impulzních generátorů

Veškeré simulace byly prováděny ve volně šiřitelném programu LTSpice. Jedná se o SPICE simulátor od Linear Technology, který umožňuje schematicky znázornit a simulovat elektrické obvody a nemá omezený počet uzlů, který je možno ve schématu zakreslit, což se pro simulování vícestupňových rázových generátorů jeví jako poměrně velká výhoda oproti ostatním komerčním softwarům.

4.1 Jednostupňové impulzní generátory

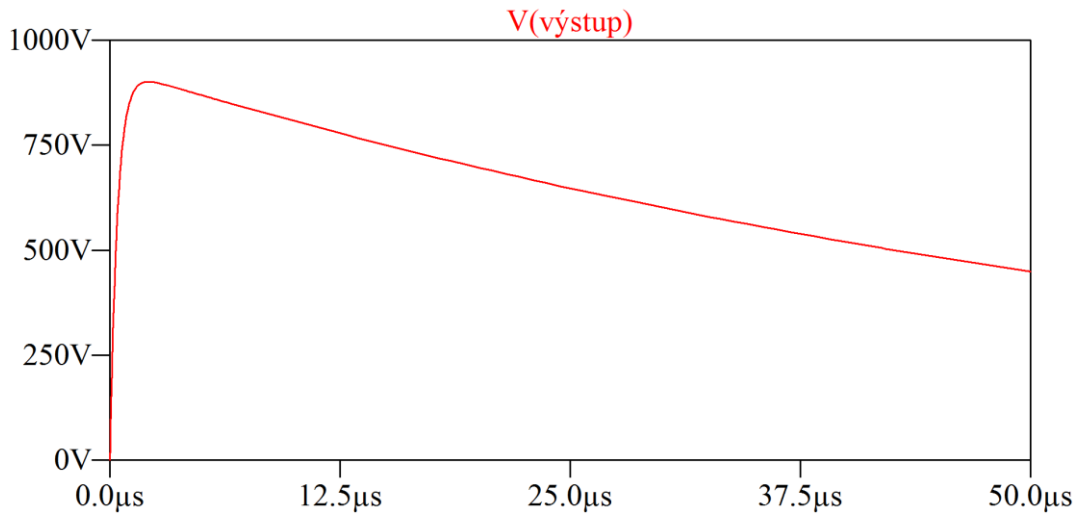
Při simulaci jednostupňového impulzního generátoru bylo vycházeno ze schématu na obrázku 4 a byly použity obě možné varianty.



Obrázek 11 Schéma jednostupňového impulzního generátoru v LTSpice podle schématu na obrázku 4 (b)

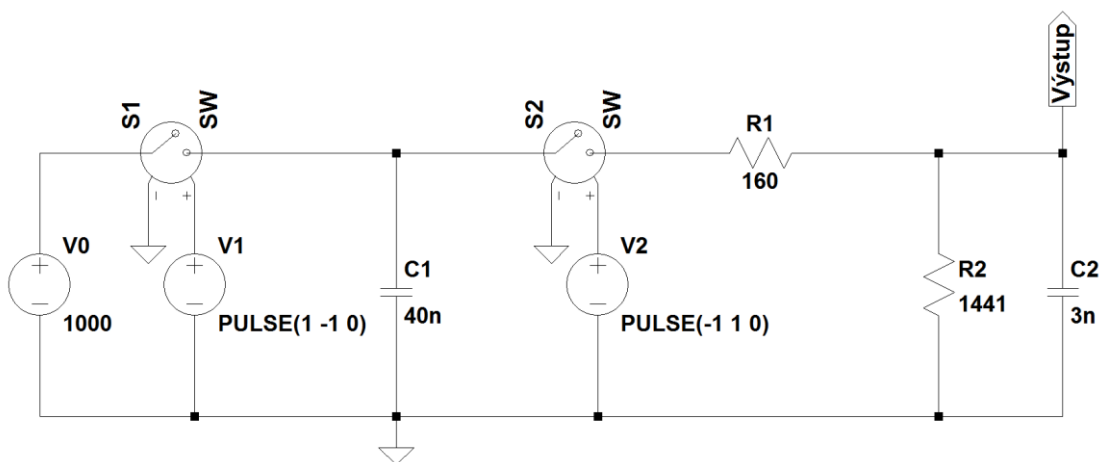
Na obrázku 11 je simulační schéma jednostupňového impulzního generátoru v prostředí LTSpice vytvořeného podle schématu na obrázku 4 (b). V0 je nabíjecí stejnosměrný zdroj nastavený na hodnotu 1000 V. Vzhledem k funkci jiskřiště byl jako jeho ekvivalentní náhrada pro simulace zvolen napěťově řízený přepínač, který je na schématu označen jako SW S1 a S2. Tento přepínač je pak řízen pulzním

napětovým zdrojem, který mění v daném čase svoji hodnotu napětí a tím řídí chod přepínače. Výstupní impulz tohoto jednostupňového generátoru je zobrazen na obrázku 12.

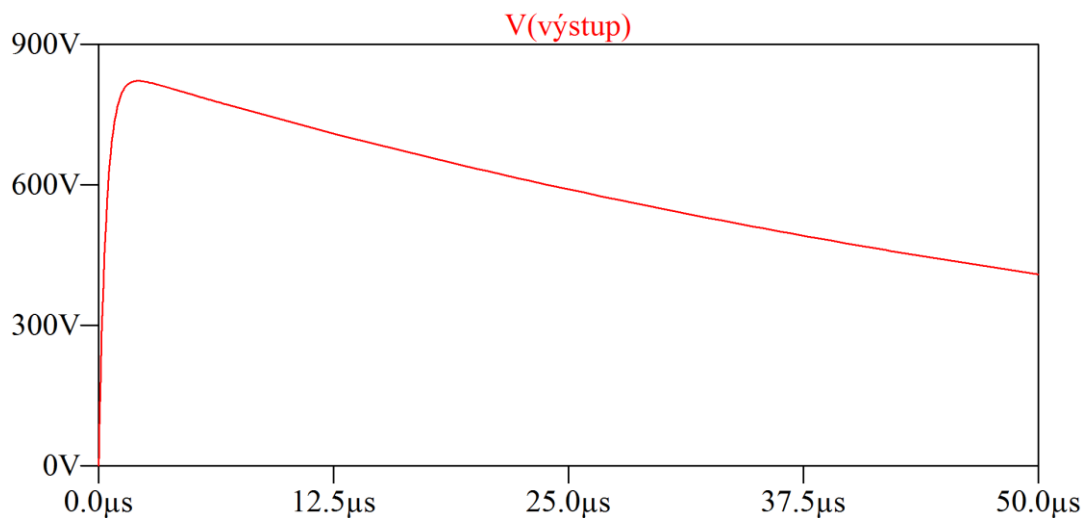


Obrázek 12 Výstupní impulz jednostupňového generátoru z obrázku 10

Jak lze z obrázku 6 vidět, má výstupní vlna očekávaný tvar 1,2/50 μ s, což odpovídá teoretickým předpokladům uvedeným v předcházejících kapitolách. Zároveň si lze všimnout, že hodnota výstupního napětí je menší než 1 kV (jistý úbytek je dán účinností generátoru, která bývá menší než 100 %, či 1). Na obrázku 13 je pak vytvořeno simulační schéma pro obvod ze schématu 4 (a) a na obrázku 14 je zobrazen napětový výstup tohoto simulačního obvodu.



Obrázek 13 Schéma jednostupňového impulzního generátoru v LTspice podle schématu na obrázku 4 (a)



Obrázek 14 Výstupní impulz jednostupňového generátoru z obrázku 12

Na první pohled je zde mezi jednotlivými obvody viditelný rozdíl ve velikosti výstupního napětí. Obvod na obrázku 13, který je v podstatě tvořen napět'ovým děličem, má totiž nižší účinnost než obvod na obrázku 11. Toto lze jednoduše ověřit pomocí zkoumání napět'ového výstupu obvodů v závislosti na rozdílném poměru kapacit obvodu C_2/C_1 , což znamená na různé kapacitní zátěži. Simulační program LTspice umožňuje vytvořit proměnnou hodnotu například pro zatěžovací kapacitu, kdy vypočte výsledek pro všechny možnosti a zobrazí je do jednoho grafu. Tento postup používání proměnných parametrů je podrobně popsán v kapitole 4.3. Pokud nyní generátory zatížíme různou kapacitní zátěží a odečteme vrcholovou hodnotu výstupního napětí pro příslušnou kapacitní zátěž, získáme následující tabulky hodnot a výsledný graf.

U_0 [V]	1000
C_1 [pF]	40 000

C_2 [pF]	U_p [V]	C_2/C_1 [-]	μ [-]
3	900,6	0,000075	0,9006
6	825,6	0,00015	0,8256
9	765,18	0,000225	0,76518
12	715,2	0,0003	0,7152
15	670,5	0,000375	0,6705
18	632,3	0,00045	0,6323
21	598,2	0,000525	0,5982
21	566,6	0,000525	0,5666
27	540,3	0,000675	0,5403
30	516,6	0,00075	0,5166

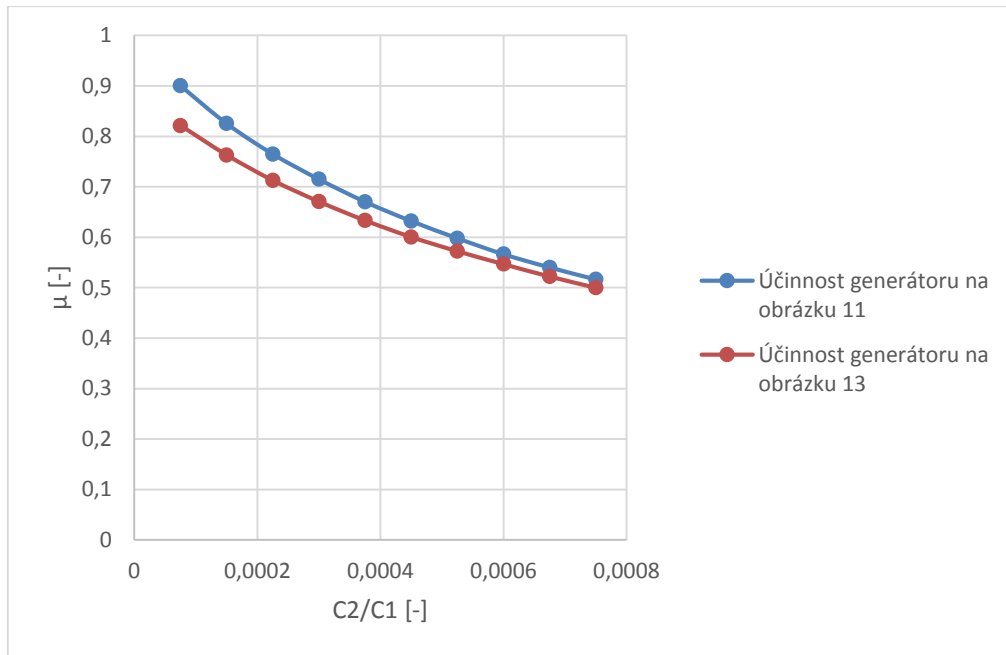
Tabulka 2 Výpočet účinnosti generátoru na obrázku 11

C_2 [pF]	U_p [V]	C_2/C_1 [-]	μ [-]
3	821,5	0,000075	0,8215
6	763,1	0,00015	0,7631
9	712,8	0,000225	0,7128
12	670,8	0,0003	0,6708
15	633,4	0,000375	0,6334
18	600,6	0,00045	0,6006
21	572,4	0,000525	0,5724
21	546,9	0,000525	0,5469
27	522,3	0,000675	0,5223
30	500,1	0,00075	0,5001

Tabulka 3 Výpočet účinnosti generátoru na obrázku 13

Příklad výpočtu účinnosti generátoru pro první hodnotu tabulky 2:

$$\mu = \frac{U_p}{U_0} = \frac{900,6}{1000} = 0,9006.$$



Graf 1 Porovnání účinnosti generátorů na obrázcích 11 a 13

Z grafu 1 i z tabulek 2 a 3 je naprosto patrné, že nižší hodnota napětí, které dosahuje impulzní generátor na obrázku 13, je dána jeho nižší účinností, která je způsobena jeho zapojením, neboť jeho rezistory tvoří napětěový dělič, což u impulzního generátoru na obrázku 11 tak není.

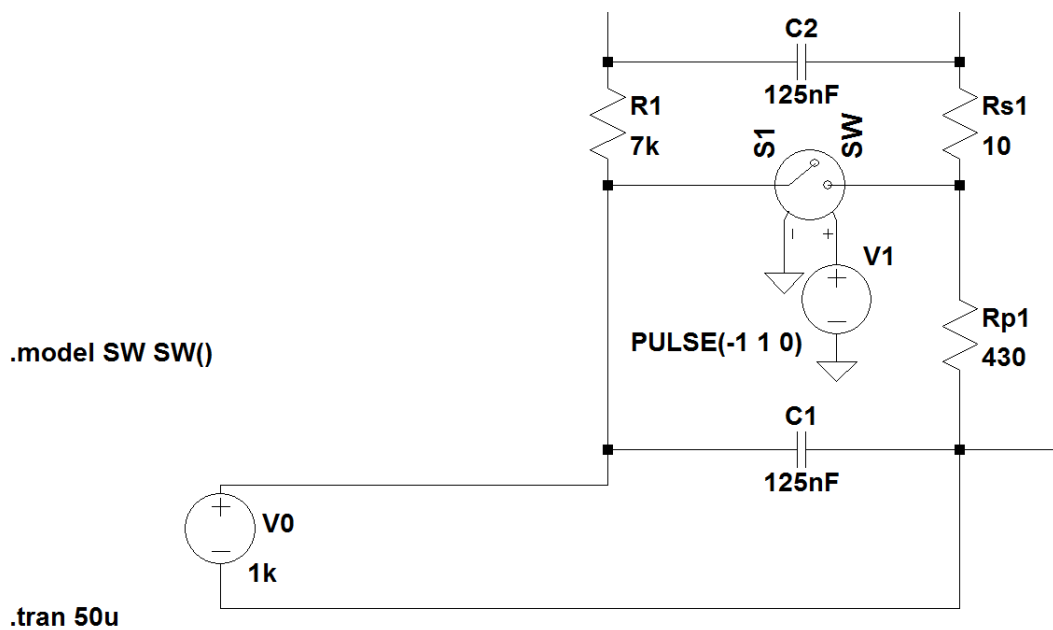
Pokud bychom chtěli dosáhnout s jednostupňovými impulzními generátory vyšších hodnot, muselo by být použito vyšší nabíjecí napětí. To ovšem nemusí být v praxi buď vůbec možné (při dosahování skutečně vysokých hodnot napětí), případně hospodárné. Z tohoto důvodu se pak používají vícestupňová zapojení, kde i s nižším nabíjecím napětím lze dosáhnout vyšších maximálních hodnot dle počtu použitých stupňů.

4.2 Vícestupňové impulzní generátory

Oproti jednostupňovým rázovým generátorům, kde byla nabíjena pouze jedna kapacita, čímž mohla být značně omezena velikost výstupního napětí, se v případě vícestupňových impulzních generátorů nabíjí několik kapacit zároveň v paralelním spojení a následně jsou pomocí jiskřišť vybíjeny v sérii, čímž se dosáhne výsledného

výstupního napětí, které je tolikrát větší, kolik má rázový generátor kapacitních stupňů. Opět zde ovšem hraje roli účinnost generátoru. Vzhledem k jejich rozlehlosti jsou celá simulační schémata, stejně tak jako některé detailnější výstupy, uvedeny v přílohách.

Jako předloha pro simulační obvod byl zvolen laboratorní impulzní generátor od výrobce HAEFELY. Na obrázku 15 je pak zobrazen detail nabíjecího stupně generátoru.

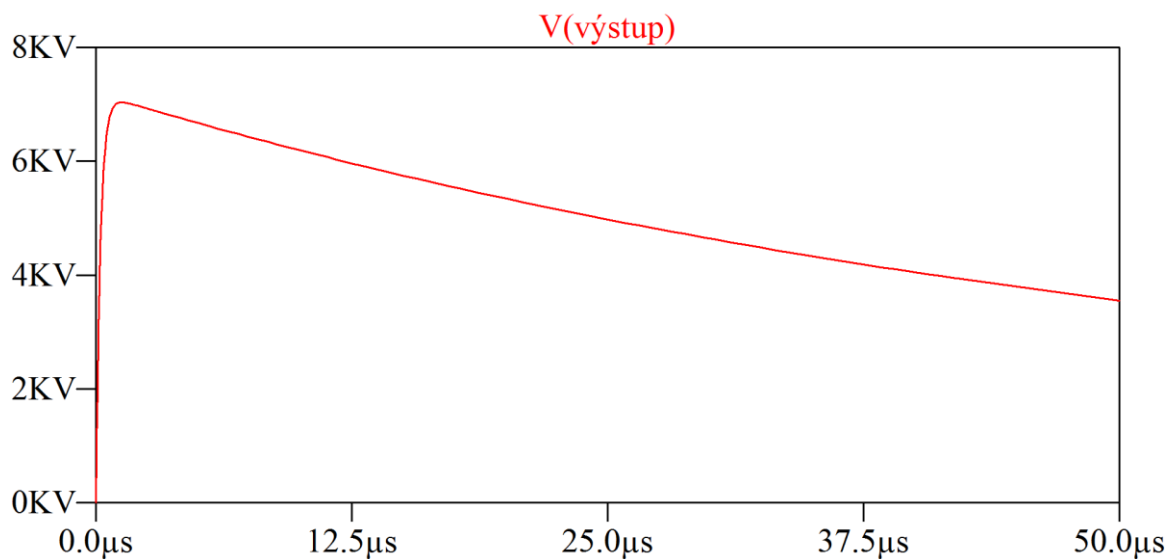


Obrázek 15 Detail nabíjecího stupně víceetapového impulzního generátoru

Na obrázku 15 po levé straně vidíme opět nabíjecí zdroj označený jako V_0 a nastavený na hodnotu 1 kV. Dva nabíjecí stupně značené jako C_1 a C_2 , příslušné odpory a také napět'ově řízený přepínač, který zde opět nahrazuje funkci jiskřiště. Každý tento přepínač je pak řízen pulzním napět'ovým zdrojem. Dále je možné si všimnout takzvaných directives, neboli příkazů pro LTspice. Jedná se o nápisy začínající s tečkou, které si program vytvoří sám, nebo je musí dopsat sám uživatel. Příkaz “.tran 50u“ se vytvoří samostatně poté, co uživatel zadá příslušné parametry pro simulaci. V tomto případě LTspice ví, že se při simulaci bude jednat o přechodnou (transient) analýzu, která bude trvat 50 μ s. Tento příkaz je možné zadat manuálně před zahájením simulace, případně lze rovnou stisknout tlačítko pro simulaci, program

zažádá o zadání příslušných parametrů a uživatel pak jen vybere, kde se ve schématu zobrazí. Příkaz “.model SW SW()“ pak pouze definuje napětově řízený přepínač. Bez uvedeného příkazu totiž LTspice model nezná. Tento příkaz už je nezbytné zadat manuálně. Oba příkazy musely být samozřejmě nastaveny i u jednostupňových simulačních obvodů, kde pouze pro jednoduchost nebyly zobrazeny. Tvorba těchto příkazů je pak podrobně předvedena v kapitole 4.3.

Výstupní napětí vícestupňového generátoru, jehož detail je zobrazen na obrázku 15, a který je složen z osmi nabíjecích stupňů, ukazuje obrázek 16.

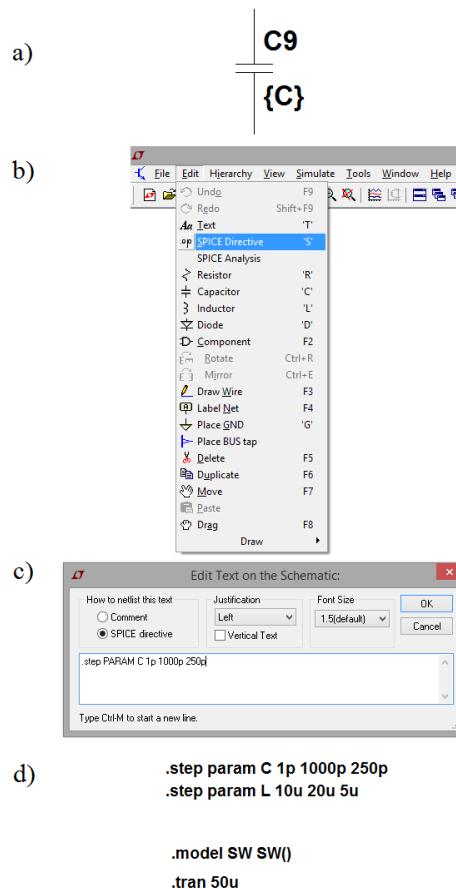


Obrázek 16 Výstupní napětí vícestupňového impulzního generátoru

Jak lze vidět, výstupní napětí simulovaného vícestupňového impulzního generátoru je v normě. Oproti jednostupňovému však lze zaznamenat patrný rozdíl ve velikosti výstupního napětí. Kde s identickým nabíjecím napětím byla u jednostupňového generátoru maximální výstupní hodnota menší než 1 kV, dostáváme se s osmistupňovým impulzním generátorem pod hodnotu 8 kV. V obou případech je zde jistý pokles daný účinností generátoru. Výrobce tohoto generátoru pak přikládá dvě možnosti, jak upravit osmistupňový generátor v případě rozdílné kapacitní zátěže, u které jsou udány určité limity. Důvod těchto úprav je možné nasimulovat a pro tento účel bude použito proměnné kapacitní zátěže.

4.3 Nastavení proměnné hodnoty v LTspice

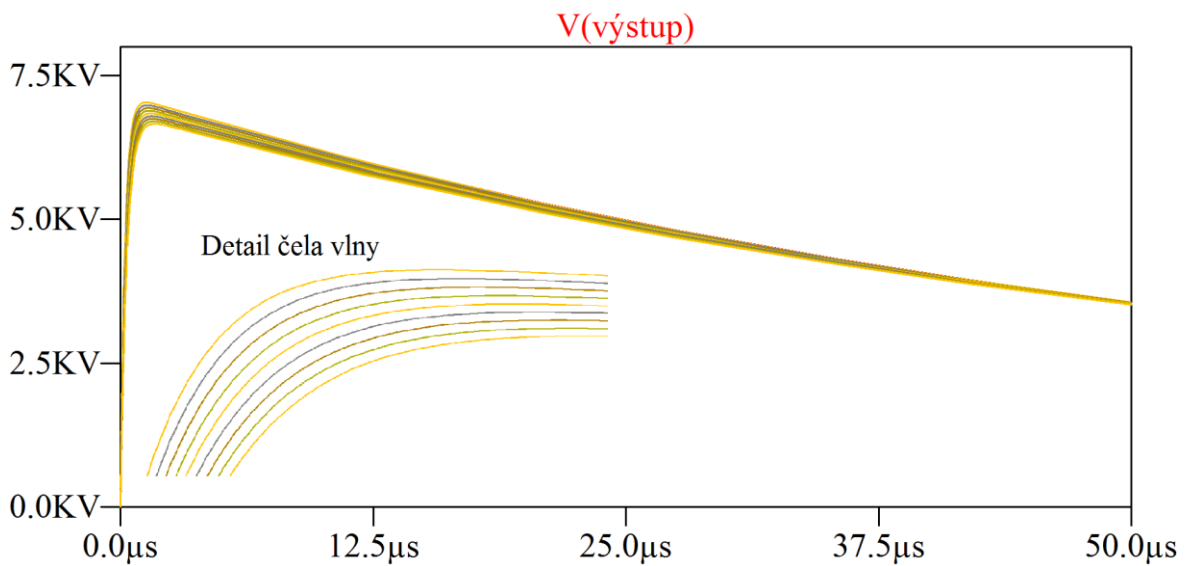
Obrázek 17 ukazuje jednotlivé kroky postupu při nastavování proměnné hodnoty v simulačním programu LTspice. Nejdříve je nutné nastavit hodnotu komponentu, u něž vyžadujeme proměnnou hodnotu, do složených závorek, ve kterých zadáme jméno této proměnné (v tomto případě {C}). Program nyní během výpočtu bude vědět, že se nejedná o pevně nastavenou hodnotu a najde si její definici, kterou je potřeba vytvořit. K tomuto kroku slouží v LTspice takzvané “directives“, které lze vložit z menu Edit → SPICE Directive. Tato volba otevře okno, kam se zadává požadovaný příkaz. V tomto případě se jedná o příkaz “.step PARAM C 1p 1000p 250p“, který znamená, že se jedná o proměnnou měnící se s daným krokem, značenou jako C, a je v rozmezí od 1 pF do 1000 pF, měnící se s krokem 250 pF. Po napsání takového příkazu už pouze umístíme hotový příkaz na libovolné místo ve schématu, což nám nabídne sám LTspice.



Obrázek 17 Proměnná hodnota komponentu v LTspice a), vložení SPICE Directive b), nastavení SPICE Directive c), umístění příkazů na pracovní plochu d)

4.4 Vliv kapacitní zátěže na výstupní vlnu generátoru

Pro zjištění vlivu velikosti kapacitní zátěže na samotný generátor je nyní tedy možné postupem, který je popsán výše, zatížit generátor požadovanými kapacitními hodnotami a výsledky promítnout do jednoho grafu, který je vidět na obrázku 18. Výrobce udávané rozmezí kapacitní zátěže pro dané zapojení generátoru je 1 pF až 1000 pF, přičemž pro simulaci byl nastaven právě tento interval s krokem 125 pF.



Obrázek 18 Vliv kapacitní zátěže na tvar výstupní vlny

Na výstupní vlně lze pozorovat, že se vzrůstající kapacitní zátěží klesá maximální hodnota výstupního napětíového impulzu. Maximální hodnota impulzu však nebývá směrodatná pro posouzení, jestli příslušná vlna vyhovuje testovacím účelům či nikoliv, neboť se počítá s tím, že maximální hodnotu je možné ve většině případů upravit pomocí nabíjecího napětí. Na obrázku 18 si lze ale v detailu čela vlny všimnout jiného problému, který s sebou zvyšování kapacitní zátěže přináší. Nejen že se totiž snižuje maximální hodnota, ale čelo vlny se zároveň posouvá i po časové ose. To znamená, že zatímco s menší kapacitní zátěží byla maximální hodnota vyšší a bylo jí dosaženo za 1,2 μs , je nyní s vyšší kapacitní zátěží maximální hodnota napětíového impulzu nižší a hlavně je jí dosaženo za čas, který přesahuje normu, která udává toleranci 1,2 $\mu\text{s} \pm 30\%$ a 50 $\mu\text{s} \pm 20\%$, což tedy dává rozmezí 0,84 μs až 1,56 μs pro T_1 a 40 μs až 60 μs pro T_2 . Z těchto důvodů pak výrobce uvádí

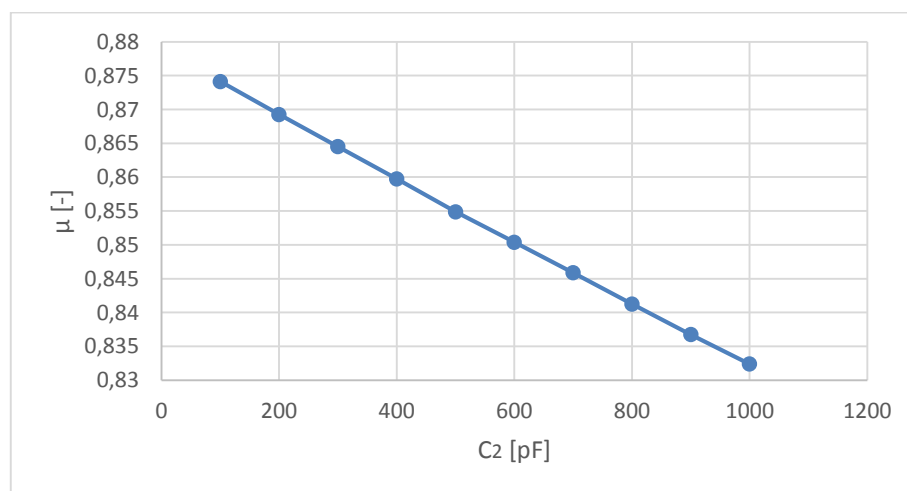
modifikace schématu pro různou kapacitní zátěž, kdy se v podstatě snižuje počet stupňů generátoru, které pak nejsou na její velikost tak náchylné, protože dojde ke změně poměru kapacit C_2 a C_1 . V tomto případě bylo dosaženo maximální hodnoty impulzu při kapacitní zátěži 1000 pF v čase 1,65 μ s, což už je mimo normou definovanou oblast. Je ovšem dobré zdůraznit, že v tomto případě už bychom se u generátoru pohybovali skutečně na hraniční hodnotě a bylo by vhodnější zvolit jiný způsob zapojení generátoru.

Pokles maximální hodnoty napětí u výstupního impulzu generátoru znamená snížení jeho účinnosti, jak je ukázáno dále. Výsledné hodnoty v závislosti čistě na zatěžovací kapacitě jsou pak uvedeny v tabulce 4 a výsledky znázorňuje graf 2.

U_{nab} [V]	8000
---------------	------

C_2 [pF]	U_p [V]	μ [-]
100	6993	0,874125
200	6954	0,86925
300	6916	0,8645
400	6878	0,85975
500	6839	0,854875
600	6803	0,850375
700	6767	0,845875
800	6730	0,84125
900	6694	0,83675
1000	6659	0,832375

Tabulka 4 Hodnoty pro výpočet účinnosti osmistupňového generátoru v závislosti na zatěžovací kapacitě

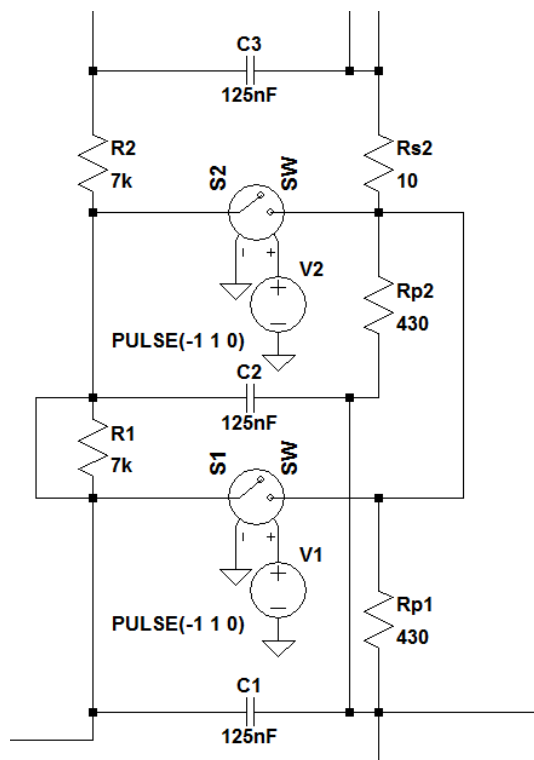


Graf 2 Účinnost generátoru v závislosti na zatěžovací kapacitě

Výpočet se provádí stejným způsobem jako u jednostupňových rázových generátorů, pouze je třeba si uvědomit, že nabíjecí napětí generátoru je nutné navíc vynásobit počtem kapacitních stupňů.

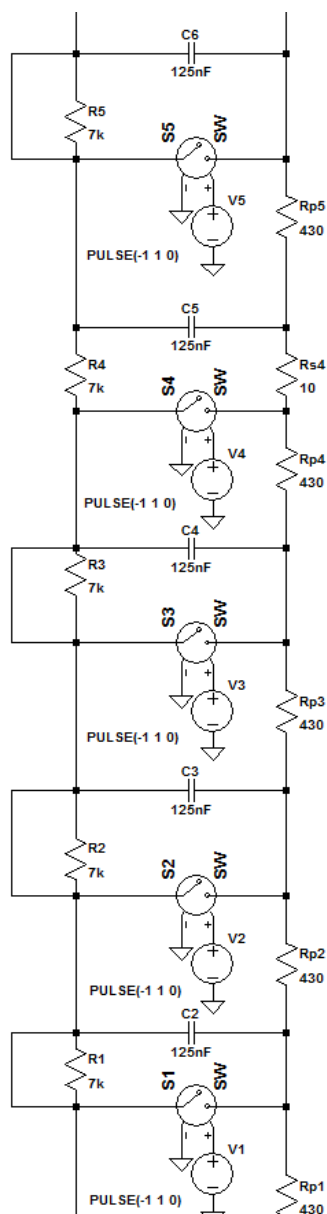
4.5 Modifikace zapojení vícestupňového generátoru

První modifikací osmistupňového zapojení, kterou vidíme na obrázku 19, je varianta přepojení generátoru do čtyřstupňového uspořádání. Tato varianta by měla zvládnout lehce vyšší kapacitní zátěž, neboť přepojením kapacit do čtyř stupňů získáme jiné výsledné kapacitní poměry při vybíjení generátoru. Ve schématu tedy dojde k tomu, že se vždy dva kapacitní stupně spojí paralelně do jedné skupiny, které tímto způsobem vzniknou čtyři a ty se posléze spojí při vybíjení sériově. Toto způsobí, že celková sériová kapacita při zapálení jiskřišť bude větší než při předchozím zapojení a změní se tudíž poměr C_2/C_1 , čímž dojde k ovlivnění výstupního impulzu.



Obrázek 19 Modifikace osmistupňového zapojení impulzního generátoru na čtyřstupňové zapojení

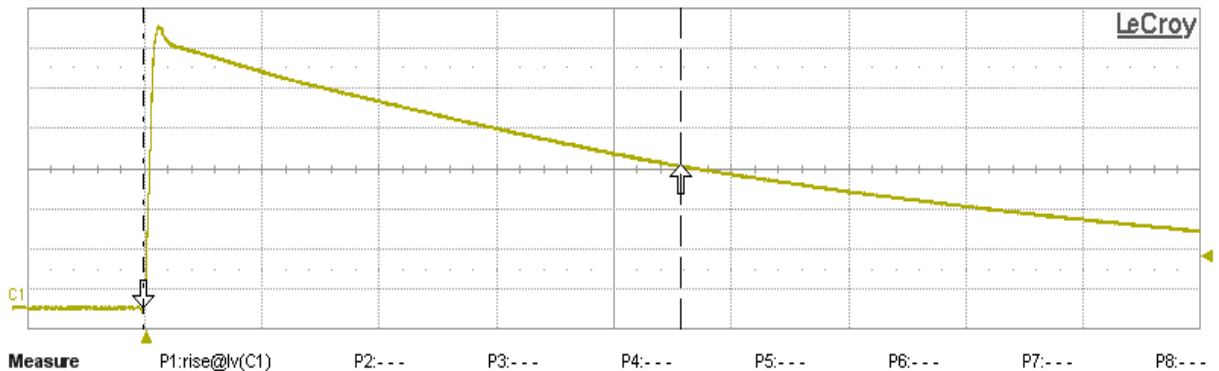
Obdobným způsobem jako v předchozím případě je možné generátor přepojit do dvoustupňového zapojení, které opět stejným způsobem změní poměry kapacit, a tím navýší možnost kapacitního zatížení generátoru. Tentokrát se pouze spojí paralelně vždy čtveřice kondenzátorů, čímž vzniknou celkem dva kapacitní stupně, které se při vybíjecím pochodu spojí sériově. Ukázka způsobu zapojení je na obrázku 20.



Obrázek 20 Modifikace osmistupňového zapojení impulzního generátoru na dvoustupňové zapojení

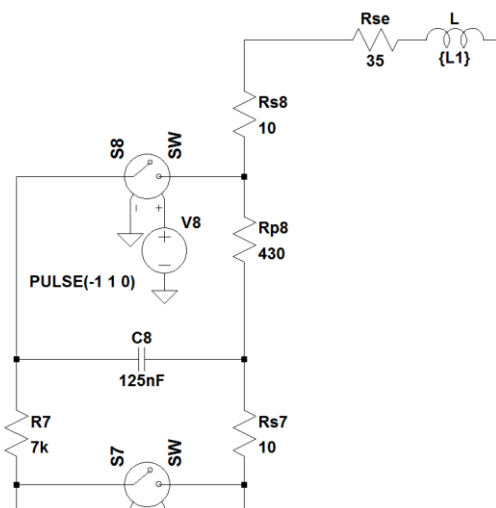
4.6 Vliv indukčnosti generátoru na výstupní impuls

V praxi je poměrně běžné se setkat s překmity ve vrcholu impulsu, jak lze vidět na obrázku 21, kde je změřený výstup reálného rázového generátoru.



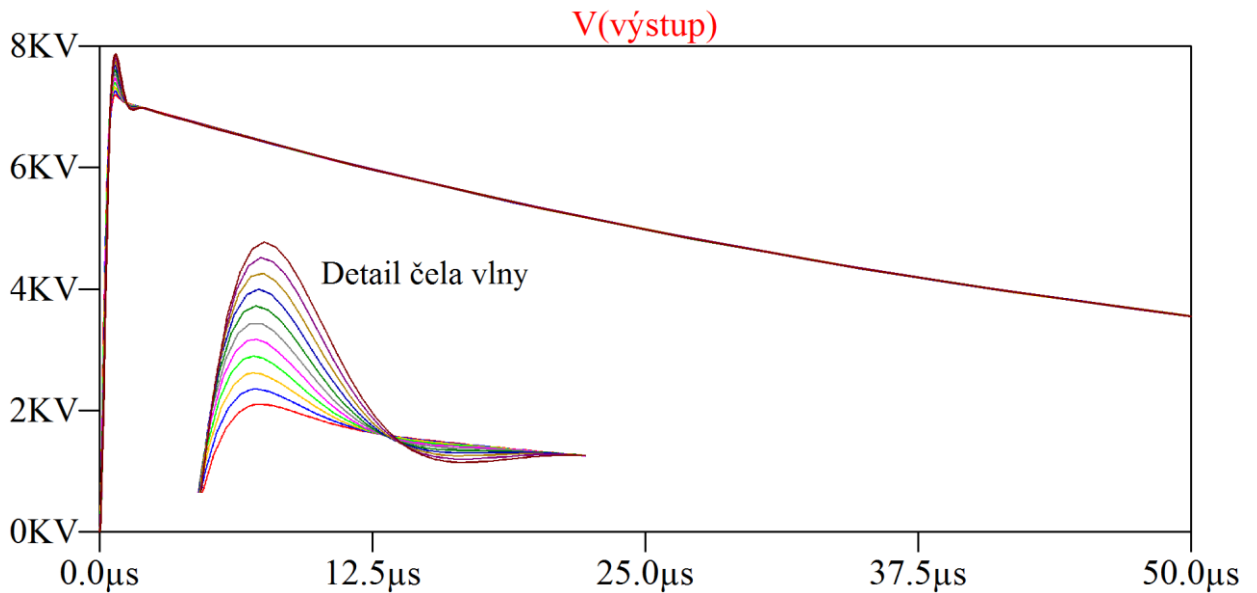
Obrázek 21 Napětový impuls reálného generátoru

Překmity jsou způsobovány vlastní indukčností generátoru. U té se samozřejmě výrobci snaží, aby byla co nejnižší, nicméně takovým, jako je například indukčnost spojovacích kabelů apod., se v praxi nedá zabránit a ve většině případů tedy překmitům nelze zabránit. V ideálním simulačním prostředí, kde byla schémata pro simulace vytvářena, však takové indukčnosti nejsou, a proto je potřeba je do schématu přidat.



Obrázek 22 Rázový generátor s vloženou indukčností

Do schématu je do výstupní části generátoru vložena cívka symbolizující celkovou náhradní indukčnost generátoru, což je naznačeno na obrázku 22. Jak již víme, projeví se vliv této indukčnosti na čele vlny.



Obrázek 23 Vliv indukčnosti generátoru na tvar výstupní vlny

Z obrázku 23 lze vyvodit, že se vzrůstající indukčností generátoru roste maximální hodnota v čele vlny. To může v extrémních případech dojít až k rozkmitání čela, jak již některé hodnoty naznačují. V praxi by se však takový jev neměl vůbec vyskytovat, avšak naprosté odstranění vlivu indukčnosti je téměř nemožné. Velikost indukčnosti generátoru byla pro tento případ zvolena v rozmezí 10 μH až 20 μH a byla měněna s krokem 1 μH , přičemž k drobnějšímu zakmitání začalo docházet už při 14 μH . V praxi je pak díky tomuto jevu poměrně obtížné určit, kdy nastalo maximum napětíové vlny, což může vést k nejistotám, zda je testovací impulz stále v rozmezí definovaném normou. Zároveň můžeme vidět, že výstupní impulz je skutečně velmi citlivý na změnu indukčnosti i o několik μH .

Závěr

Na úvod této diplomové práce byl dle prvního bodu zadání vytvořen teoretický základ pro pochopení funkčních principů vysokonapěťových impulzních generátorů, způsobů jejich zapojení a chování výstupního impulzu. Dále byly popsány požadované parametry výstupního napěťového impulzu, a protože tento impulz je velmi citlivý na velikosti kapacitních a induktivních parametrů obvodu a v praxi je obtížné dosahovat jeho přesných, normou definovaných hodnot, jsou v práci také popsány povolené odchylky od požadovaného tvaru pro napěťové impulzy.

Pro ukázkou základních principů byly vytvořeny dva jednostupňové simulační obvody, které se na první pohled liší nepatrně, nicméně bylo ukázáno, že jejich způsob zapojení má značný vliv na jejich účinnost a tedy i na maximální hodnotu výstupního napětí impulzního generátoru. Výstupní část jednoho z těchto generátorů byla v podstatě tvořena napěťovým děličem a toto zapojení dosahovalo nižší amplitudy výstupního napěťového impulzu.

Dále byly zpracovány simulační obvody zapojené dle skutečných provozních zapojení laboratorního generátoru, kde výrobce uvádí možnosti základního zapojení jako generátoru osmistupňového, které je dle potřeby (kapacitního zatížení generátoru) modifikováno na čtyřstupňové či dvoustupňové zapojení. V diplomové práci je ukázáno a vysvětleno, že toto řešení je reakcí na potřebu vyššího kapacitního zatížení generátoru, která se v praxi běžně vyskytuje, a které má za následek jednak pokles maximální hodnoty výstupního impulzního napětí, ale také změnu časových parametrů tohoto impulzu. Změnou zapojení impulzního generátoru pak dochází ke změně poměru kapacit C_2/C_1 , který má vliv na výstupní tvar a amplitudu napěťového impulzu, jak je popsáno v teoretické části této diplomové práce. Zároveň byl ukázán vliv indukčnosti samotného impulzního generátoru na tvar jeho výstupního napěťového impulzu. Ukázalo se, že i relativně malá změna indukčnosti (v jednotkách μH) může mít poměrně zásadní vliv na čelo výstupního impulzu.

V rámci diplomové práce bylo vytvořeno několik funkčních simulačních obvodů, které mohou nadále sloužit jako učební pomůcka díky možnosti rychle a jednoduše demonstrovat základní principy vysokonapěťových impulzních generátorů a vlivů jednotlivých parametrů na jejich výstupní napěťový impulz.

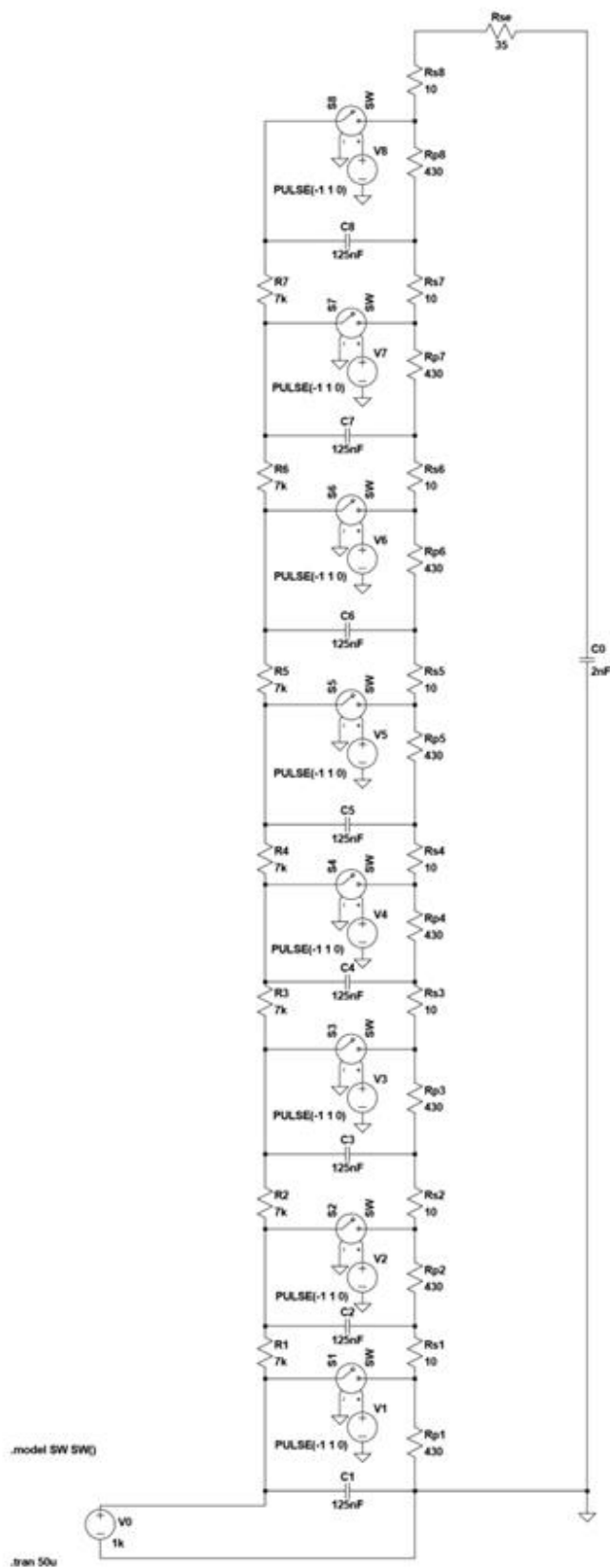
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VEVERKA, A.: *Technika vysokých napětí: vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty*. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978, 295 s. Řada elektrotechnické literatury.
- [2] SCHON, K.: *High impulse voltage and current measurement techniques fundamentals, measuring instruments, measuring methods*. Cham: Springer, 2013. ISBN 9783319003788.
- [3] KUFFEL, E., ZAENGL, W. a KUFFEL, J.: *High voltage engineering: fundamentals*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000, xiii, 539 p.
- [4] Impulse generator. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-04-16]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Impulse_generator
- [5] LTspice Tutorial. [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z:
<http://denethor.wlu.ca/ltspice/#para>
- [6] SPICE - a brief overview. [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z:
<http://www.seas.upenn.edu/~jan/spice/spice.overview.html>
- [7] MIKKELSEN, J. H.: *LTspice - An Introduction* [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z:
http://kom.aau.dk/~hmi/Teaching/LTspice/restrict/LTspicedoc/LTspice_guide.pdf
- [8] Multistage Impulse Generator and their Triggering Methods. [online]. [cit. 2015-04-16]. Dostupné z:
http://nptel.ac.in/courses/108104048/ui/Course_home5_29.htm
- [9] BLAŽEK, V., SKALA, P.: Vysoká napětí a elektrické přístroje. Část I: Vysoké napětí. [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z:
<http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/skripta-vysoke-napeti-cast-i-m10824-p1.html>

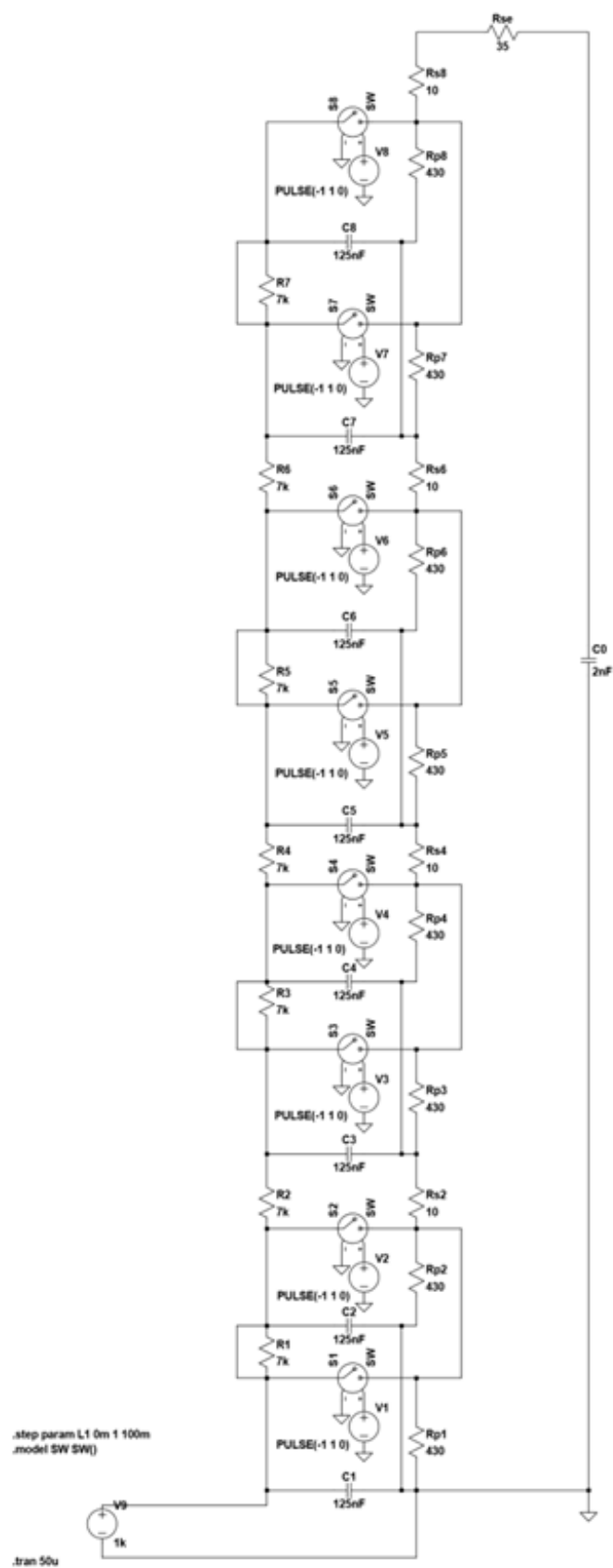
- [10] IEEE POWER @ ENERGY SOCIETY, SPDC: Impulse generators used for testing low-voltage equipment. [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z:
http://pes-spdc.org/sites/default/files/Impulse_generatorsaddedrev2.pdf
- [11] ČSN EN 60060-1. Technika zkoušek vysokým napětím: Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky.

Přílohy

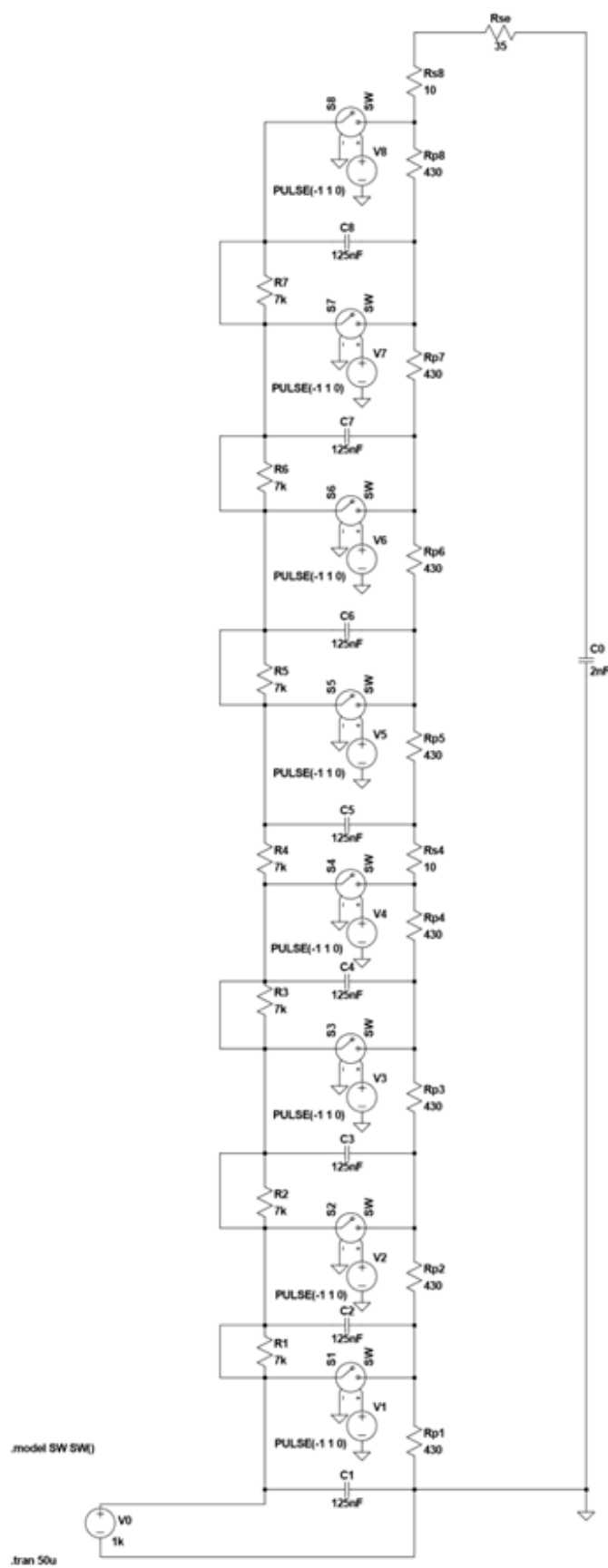
Příloha A – Simulační schéma osmistupňového generátoru



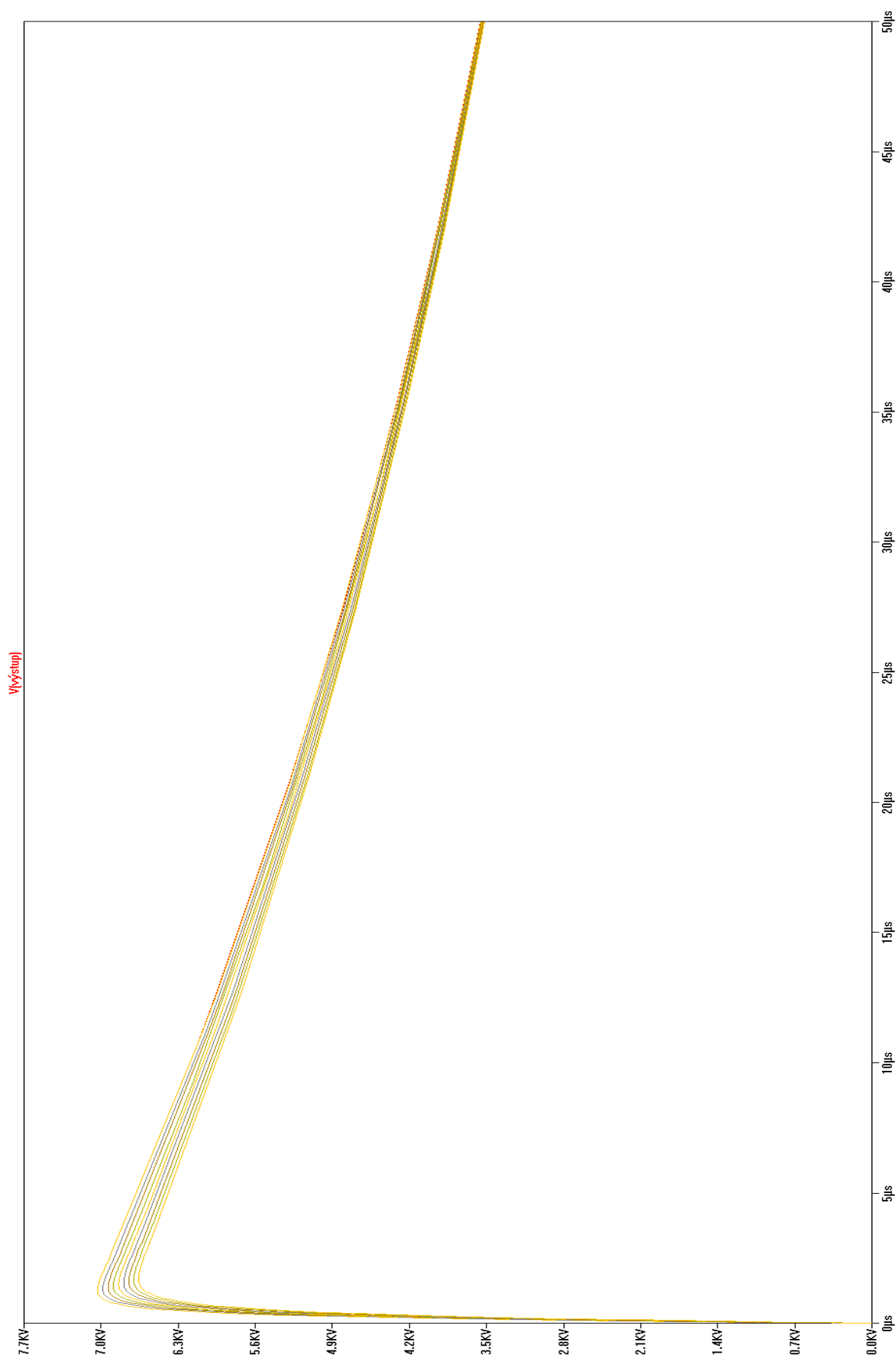
Příloha B – Simulační schéma čtyřstapňového generátoru



Příloha C – Simulační schéma dvoustupňového generátoru



Příloha D – Vliv kapacitní zátěže na výstupní impulz generátoru



Příloha D – Vliv indukčnosti generátoru na výstupní impuls