



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VYTVÁŘENÍ NAPĚŤOVÉ VLNY RÁZOVÝM GENERÁTOREM

GENERATION OF VOLTAGE WAVE BY IMPULSE GENERATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miroslav Poloni

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Luděk Pelikán

BRNO 2020



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Miroslav Poloni

ID: 203593

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Vytváření napěťové vlny rázovým generátorem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s principem rázového generátoru.
2. Provedte teoretický rozbor zkoušek rázovou vlnou.
3. Zaměřte se na změnu tvaru napěťové vlny při různé zátěži a změnách v obvodu.
4. V simulačním programu proveďte úkoly vhodné pro praktické zkoušení s reálným rázovým generátorem.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Luděk Pelikán

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

POLONI, Miroslav. *Vytváření napěťové vlny rázovým generátorem* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127269>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Ing. Luděk Pelikán.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Vytváření napěťové vlny rázovým generátorem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 10.6.2020

.....

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá problematikou a funkcí rázových generátorů napětí. V teoretické části jsou popsány funkce a různá zapojení rázového generátoru, druhy impulzního napětí, zkoušky a zkušební postupy. V praktické části práce byly ověřeny teoretické poznatky v podobě simulací. Simulace byly prováděny v programu LTspice od společnosti Linear Technology, kde byl vymodelován model rázového generátoru. Na daném modelu rázového generátoru byly následně provedeny simulace od jednodušších, jako jsou např. závislost velikosti zatěžovací kapacity až po paralelně připojené indukčnosti. Výsledky všech simulací by měly znamenat přínos a usnadnění při reálných zkouškách rázovým generátorem.

KLÍČOVÁ SLOVA: Rázový generátor, simulace, LTspice, zkoušky, atmosférický impulz, spínací impulz

ABSTRACT

The presented bachelor thesis deals with the problems and functions of impulse voltage generators. The theoretical part describes the functions and various connections of the impulse generator, types of impulse voltage, tests and test procedures. In the practical part of the work, theoretical knowledge in the form of simulations was verified. The simulations were performed in the LTspice program from Linear Technology, where the impulse generator model was made. Simulations were then performed on the given model of the shock generator, from simpler ones such as the dependence of the size of the load capacity to the inductance connected in parallel. The results of all simulations should bring benefits and ease in real shock generator tests

KEY WORDS: Impulse generator, simulation, Ltspice, tests, lightning impulse, switching impulse

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této bakalářské práce Ing. Luděkovi Pelikánovi za jeho pomoc a odborné rady během vypracovávání této práce.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 PRINCIP FUNKCE RÁZOVÉHO GENERÁTORU NAPĚTÍ	12
1.1 JEDNOSTUPŇOVÝ RÁZOVÝ GENERÁTOR NAPĚTÍ	12
1.2 VÍCESTUPŇOVÝ RÁZOVÝ GENERÁTOR NAPĚTÍ	14
2 ELEKTRICKÉ NAMÁHÁNÍ	16
2.1 ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ NAPĚTÍ	16
2.1.1 PLNÝ ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ NAPĚTÍ.....	16
2.1.2 USEKNUTÝ ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ.....	19
2.1.3 VOLTSEKUNDOVÁ CHARAKTERISTIKA	21
2.2 SPÍNACÍ IMPULZ NAPĚTÍ	21
3 ZKOUŠKY A ZKUŠEBNÍ POSTUPY	23
3.1 DĚLENÍ ZKOUŠEK Z HLEDISKA ATMOSFÉRICKÝCH PODMÍNEK	23
3.1.1 ZKOUŠKA ZA SUCHA	23
3.1.2 ZKOUŠKA ZA MOKRA	23
3.1.3 ZKOUŠKY UMĚLÝM ZNEČIŠTĚNÍM	24
3.2 ZKOUŠKY ATMOSFÉRICKÝMI IMPULZY	24
3.2.1 ZKOUŠKY VÝDRŽNÝM NAPĚTÍM	24
3.2.2 ZKOUŠKY ZARUČENÉHO NAPĚTÍ PRŮRAZNÉHO VÝBOJE.....	26
3.3 ZKOUŠKY SPÍNACÍMI IMPULZY	26
4 SIMULACE PRŮBĚHŮ	27
4.1 OVĚŘENÍ SIMULACE POMOCÍ MATEMATICKÝCH VÝPOČTŮ	27
4.2 SIMULACE S ČISTĚ KAPACITNÍ ZÁTĚŽÍ	30
4.3 SIMULACE S PŘIDANOU SÉRIOVOU INDUKTIVNÍ SLOŽKOU	33
4.4 SIMULACE PRO VOLBU EXTERNÍHO REZISTORU	34
4.5 SIMULACE S PŘIDANOU PARALELNÍ INDUKTIVNÍ SLOŽKOU	36
ZÁVĚR	43
POUŽITÁ LITERATURA	45

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1 Schéma jednostupňového rázového generátoru napětí</i>	12
<i>Obr. 1-2 Možné schéma zapojení vícešupňového rázového generátoru napětí</i>	15
<i>Obr. 2-1 Plný atmosférický impulz (převzato z [4])</i>	17
<i>Obr. 2-2: Průběh základní a zaznamenané křivky s překmitem a zbytkovou křivkou (převzato z [4])</i>	18
<i>Obr. 2-3: Průběh zkušebního napětí (převzato z [4])</i>	18
<i>Obr. 2-4: Průběh zaznamenané a zkušební křivky (převzato z [4])</i>	19
<i>Obr. 2-5: Atmosférický impulz useknutý v čele vlny (převzato z [4])</i>	20
<i>Obr. 2-6: Atmosférický impulz useknutý v týlu vlny (převzato z [4])</i>	20
<i>Obr. 2-7: Voltsekundová charakteristika pro impulzy s konstantním předpokládaným tvarem (převzato z [4])</i>	21
<i>Obr. 2-8: Spínací impulz napětí (převzato z [4])</i>	22
<i>Obr. 4-1 Schéma jednostupňového rázového generátoru</i>	27
<i>Obr. 4-2 Průběh výstupního napětí jednostupňového rázového generátoru</i>	28
<i>Obr. 4-3 Průběh výstupního napětí určen matematickým výpočtem</i>	29
<i>Obr. 4-4 Hodnoty T_2/T_1, T_2/Θ, a $\eta(U_m/U_c)$ jako funkce α (převzato z [1])</i>	29
<i>Obr. 4-5 Částečné schéma desetistupňového rázového generátoru v programu LTspice</i>	31
<i>Obr. 4-6 Průběh výstupního napětí rázového generátoru pro hodnotu kapacity 1nF</i>	31
<i>Obr. 4-7 Průběh výstupního napětí rázového generátoru pro hodnotu kapacity 1nF až 5nF</i>	32
<i>Obr. 4-8 Průběh výstupního napětí rázového generátoru se sériovou indukční složkou</i>	33
<i>Obr. 4-9 Částečné schéma univerzitního desetistupňového rázového generátoru v programu LTspice</i>	35
<i>Obr. 4-10 Průběhy výstupních napětí pro různé hodnoty externího rezistoru</i>	36
<i>Obr. 4-11 Průběhy výstupního napětí pro různé hodnoty paralelně připojené indukčnosti</i>	37
<i>Obr. 4-12 Průběhy výstupního napětí pro různé hodnoty týlního rezistoru R_2</i>	38
<i>Obr. 4-13 Schéma Glaningerova obvodu</i>	39
<i>Obr. 4-14 Částečné schéma univerzitního desetistupňového rázového generátoru s Glaningerovým obvodem v programu LTspice</i>	40
<i>Obr. 4-15 Porovnání průběhů výstupního napětí s Glaningerovým obvodem a bez něj</i>	40
<i>Obr. 4-16 Závislost velikosti podkmitu na hodnotě odporu R_p</i>	41

Seznam tabulek

<i>Tab. 3-1 Parametry deště pro normalizovaný postup (převzato z [4])</i>	24
<i>Tab. 4-1 Změřené a vypočtené hodnoty výstupního napětí pro jednostupňový rázový generátor</i> .	28
<i>Tabulka 4-2 Změřené a vypočítané hodnoty výstupního napětí určeného matematickým výpočtem</i>	30
<i>Tab. 4-3 Naměřené a vypočítané hodnoty výstupního napětí pro kapacitu $1nF$</i>	32
<i>Tab. 4-4 Změřené a vypočtené hodnoty pro různé velikosti zátěže C_2</i>	33
<i>Tab. 4-5 Naměřené a vypočítané hodnoty výstupního napětí pro přidanou sériově zapojenou indukčnost</i>	34
<i>Tab. 4-6 Naměřené a vypočítané hodnoty pro simulaci externího rezistoru</i>	35
<i>Tab. 4-7 Změřené doby půltýlu T_2 pro různé hodnoty paralelně připojené indukčnosti</i>	37
<i>Tab. 4-8 Naměřené a vypočítané hodnoty podkmitů pro různé hodnoty týlního rezistoru</i>	38
<i>Tab. 4-9 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot s Glaningerovým obvodem a bez něj</i>	41
<i>Tab. 4-10 Změřené a vypočtené hodnoty při změně rezistoru R_p</i>	42

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

C' [F]	Kapacita do série spojených kondenzátorů
C_1 [F]	Činná kapacita
C_2 [F]	Zatěžovací kapacita
J	Jiskřiště
K_t	Korekční činitel
K_1, K_2	Konstanty počátečních podmínek
k_1	Korekční činitel na hustotu vzduchu
k_2	Korekční činitel na vlhkost vzduchu
O	<i>Počátek</i>
O_1	Zdánlivý počátek
L_g [H]	Indukčnost Glaningerovy cívky
R [Ω]	Nabíjecí rezistor
R_1 [Ω]	Čelní rezistor
R_2 [Ω]	Týlní rezistor
R_a [Ω]	Tlumicí rezistor
R_p [Ω]	Paralelní rezistor Glaningerova obvodu
s	Směrodatná odchylka
t [s]	Čas
T_1 [s]	Doba čela
T_2 [s]	Doba půltýlu
T' [s]	Doba počátku
T_c [s]	Doba useknutí
T_d [s]	Doba nad 90 %
T_p [s]	Doba do vrcholu
T_z [s]	Doba k nule
$u_1(t)$	Napětí na kapacitě C_1
$u_2(t)$	Napětí na kapacitě C_2
U [V]	Stejnoseměrné napětí
U_0 [V]	Napětí referenčních normalizovaných atmosférických podmínek
U_1 [V]	Vstupní napětí
U_2 [V]	Výstupní napětí

U_e [V]	Krajní hodnota napětí zaznamenané křivky pro překmit
U_b [V]	Vrcholová hodnota napětí základní křivky pro překmit
U_{10} [V]	10 % napětí průrazného výboje
U_{50} [V]	50 % napětí průrazného výboje
α_1, α_2	Kořeny charakteristické rovnice
β [V]	Velikost překmitu
β' [%]	Relativní velikost překmitu
τ_1, τ_2	Časové konstanty

ÚVOD

Problematika související s elektrickým namáháním izolace elektrických zařízení, která jsou součástí přenosu a distribuce elektrické energie, je důležitý aspekt elektroenergetiky. Během svého provozu je izolační materiál namáhán elektrickým napětím a proudem. Namáhání, na které je izolační materiál naddimenzován, se nazývá provozní napětí, které za normálních podmínek nenarušuje stav izolačního materiálu. Namáhání, které výrazně zatěžuje izolační materiál, se nazývá přepětí, které můžeme dělit na vnější a vnitřní. Tato práce se zabývá laboratorními způsoby testování přepětí v podobě atmosférických a spínacích přepětí. V obou případech může amplituda napětí přesáhnout maximální dovolené provozní napětí. U atmosférických impulzů se maximální hodnota napětí pohybuje ve stovkách kilovoltů až jednotkách megavoltů. Spínací impulzy souvisejí s provozním napětím a obecně dosahují nižších maximálních hodnot a delší doby trvání.

V praxi se v laboratořích vysokého napětí zkouší izolace elektrických zařízení za pomoci rázového generátoru napětí, jenž byl navržen již na začátku 20. století německým inženýrem Erwinem Otto Marxem. Rázové generátory jsou napěťové, nebo proudové a v obou případech slouží k vytváření požadovaných impulzů o vysokých amplitudách, které jsou následně přikládány na testované zařízení. Rázový generátor je navržen tak, aby simuloval úder blesku nebo spínání, které může nastat na elektrickém vedení nebo jiném elektrickém zařízení. Atmosférické a spínací impulzy vytvářené rázovým generátorem mají dle normy ČSN EN 60060-1 přesně stanovený tvar a dovolené tolerance. Úkolem těchto zkoušek je zjistit elektrickou pevnost izolačního materiálu daného testovaného zařízení a hledání vlivů přepětí na izolaci.

Zkoušky rázovými generátory mohou být prováděny za různých atmosférických podmínek, které jsou sledovány z toho důvodu, aby bylo zřejmé, za jakých podmínek bylo testováno. Při opakování zkoušky za stejných, nebo jiných podmínek může dojít k rozdílným výsledkům při jejich porovnání. Následně jsou nová zařízení zkontrolována příslušnou technickou komisí, která vyhodnotí stav testovaného zařízení a určí, zda zkoušce vyhověl, či nikoliv. Příslušná technická komise může také specifikovat průběh zkoušky. U typických zařízení se zkouší dle testovacích norem nebo specifikací k testovaným zařízením.

Úkolem této bakalářské práce bylo ověření teoretických poznatků pomocí simulací. Ověření správnosti simulovaných průběhů, následné sledování a vyhodnocování výstupního napětí rázového generátoru pro různá zapojení a různé zátěže. Simulace bylo možné realizovat za pomoci programu LTspice.

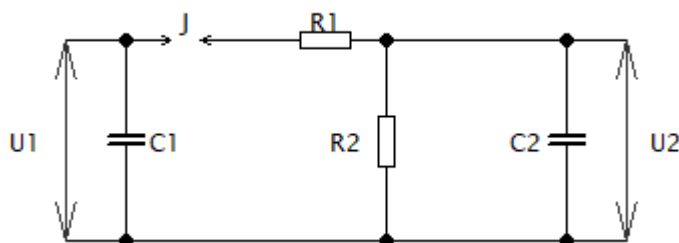
1 PRINCIP FUNKCE RÁZOVÉHO GENERÁTORU NAPĚTÍ

Rázové generátory se používají v laboratořích vysokého napětí pro zkoušky atmosférickými a spínacími impulzy. Zkoušky se převážně provádějí pro zkoušení izolace transformátorů, vedení a přístrojů ke zjištění ochranného působení zemních lan a pro studium výbojů při vysokém a velmi vysokém napětí. Rázové generátory se konstrukčně liší, z tohoto důvodu je dělíme na jednostupňové a vícestupňové [1; 2].

1.1 Jednostupňový rázový generátor napětí

Na Obr. 1-1 je jedno z možných zapojení jednostupňového rázového generátoru, kde C_1 značí kondenzátor s tzv. činnou kapacitou, C_2 zatěžovací kapacitu, R_1 čelní odpor a R_2 týlní odpor. Kondenzátor C_1 , ve kterém se nahromadí energie potřebná k impulzu, je nabíjen ze stejnosměrného zdroje. Při dostatečném nabití C_1 se aktivuje jiskřiště J , přičemž přeskoková vzdálenost jiskřiště se musí měnit s požadovaným výstupním napětím na U_2 . Přes jiskřiště dále proudí nahromaděná energie do obvodu R_1 , R_2 , C_2 . Rezistor R_1 slouží k nabití zatěžovací kapacity a případně kapacity testovaného zařízení, omezuje tedy velikost proudu v čele impulzu. Přes rezistory R_1 a R_2 je vybíjena zatěžovací kapacita a tím je ovlivněna doba trvání impulzu [1].

Velkou nevýhodou jednostupňových rázových generátorů je omezená velikost vstupního nabíjecího napětí. Jelikož se v praxi používají impulzy s vrcholovou hodnotou stovek kV až jednotek MV, použití jednostupňového rázového generátoru by bylo velmi obtížné. Proto se pro tato značně vysoká napětí používají vícestupňové rázové generátory napětí v tzv. Marxově zapojení [2].



Obr. 1-1 Schéma jednostupňového rázového generátoru napětí

Odvození výstupního napětí jednostupňového rázového generátoru napětí

U rázových generátorů nás nejvíce zajímá výsledný výstup. Tím je myšlena výstupní vrcholová hodnota napětí a celkové parametry vlny, kterou rázový generátor vytvoří na testovaném zařízení. Pro dosažení předepsané výstupní vlny můžeme měnit jednotlivé komponenty (odpory a kapacity) rázového generátoru. To se týká především čelního odporu R_1 a týlního odporu R_2 . Hodnota kondenzátoru C_1 je také modifikovatelná a hodnota kondenzátoru C_2 bývá zpravidla pevně daná [2].

Následné vztahy uvádí zdroj [2]. Ze schématu viz Obr. 1-1 označíme $u_1(t)$ průběh napětí na kapacitě C_1 a $u_2(t)$ průběh napětí na kapacitě C_2 . Poté z 2. Kirchhoffova zákona platí

$$u_1 = R_1 i_{R1}(t) + u_2(t) \quad (1.1)$$

Rezistorem R_1 protéká proud $i_{R1}(t)$, který můžeme vyjádřit pomocí napětí $u_2(t)$

$$i_{R1}(t) = -C_1 \frac{du_1(t)}{dt} \quad (1.2)$$

Rovnici (1.2) dosadíme do rovnice (4.7) a získáme tvar

$$u_1 = -R_1 C_1 \frac{du_1(t)}{dt} + u_2(t) \quad (1.3)$$

Z 1. Kirchhoffova zákona platí

$$-C_1 \frac{du_1(t)}{dt} = \frac{u_2(t)}{R_2} + C_2 \frac{du_2(t)}{dt} \quad (1.4)$$

Zderivujeme-li rovnice (1.3) a (1.4) podle času, dostaneme

$$\frac{du_1(t)}{dt} = -R_1 C_1 \frac{d^2 u_1(t)}{dt^2} + \frac{d^2 u_2(t)}{dt^2} \quad (1.5)$$

$$-C_1 \frac{d^2 u_1(t)}{dt^2} = \frac{1}{R_2} \frac{du_2(t)}{dt} + C_2 \frac{d^2 u_2(t)}{dt^2} \quad (1.6)$$

Napětí $u_1(t)$ první a druhé derivace z (4.7) a (1.6) dosadíme do rovnice (1.5). Po dosazení a úpravách dostaneme pro napětí $u_2(t)$ homogenní diferenciální rovnici 2. řádu s konstantními koeficienty

$$\frac{d^2 u_2(t)}{dt^2} + \frac{R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2}{R_1 C_2} \frac{du_2(t)}{dt} + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2} u_2(t) = 0 \quad (1.7)$$

Její řešení je

$$u_2(t) = K_1 e^{\alpha_1 t} + K_2 e^{\alpha_2 t} \quad (1.8)$$

kde K_1 a K_2 jsou konstanty plynoucí z počátečních podmínek a α_1 , α_2 jsou kořeny charakteristické rovnice

$$\alpha^2 + \frac{R_1 C_1 + R_2 C_1 + R_2 C_2}{R_1 C_2} \alpha + \frac{1}{R_1 C_1 R_2 C_2} = 0 \quad (1.9)$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{-(R_1C_1 + R_2C_1 + R_2C_2) \pm \sqrt{(R_1C_1 + R_2C_1 + R_2C_2)^2 - 4R_1C_1R_2C_2}}{2R_1C_1R_2C_2} \quad (1.10)$$

Z počátečních podmínek lze určit konstanty K_1 a K_2

$$\begin{aligned} (u_2)_{t=0} &= 0 \\ \left(C_2 \frac{du_2(t)}{dt} \right)_{t=0} &= \frac{U_1}{R_1} \end{aligned} \quad (1.11)$$

kde U_1 je napětí na kapacitě C_1 na začátku výboje. Po dosazení do (1.8) dostaneme konečný vztah pro napětí na zatěžovací kapacitě

$$u_2(t) = U_1 \frac{R_2C_1}{\sqrt{(R_1C_1 + R_2C_1 + R_2C_2)^2 - 4R_1C_1R_2C_2}} (e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}) \quad (1.12)$$

$$k = \frac{R_2C_1}{\sqrt{(R_1C_1 + R_2C_1 + R_2C_2)^2 - 4R_1C_1R_2C_2}} \quad (1.13)$$

$$u_2(t) = U_1 k (e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}) \quad (1.14)$$

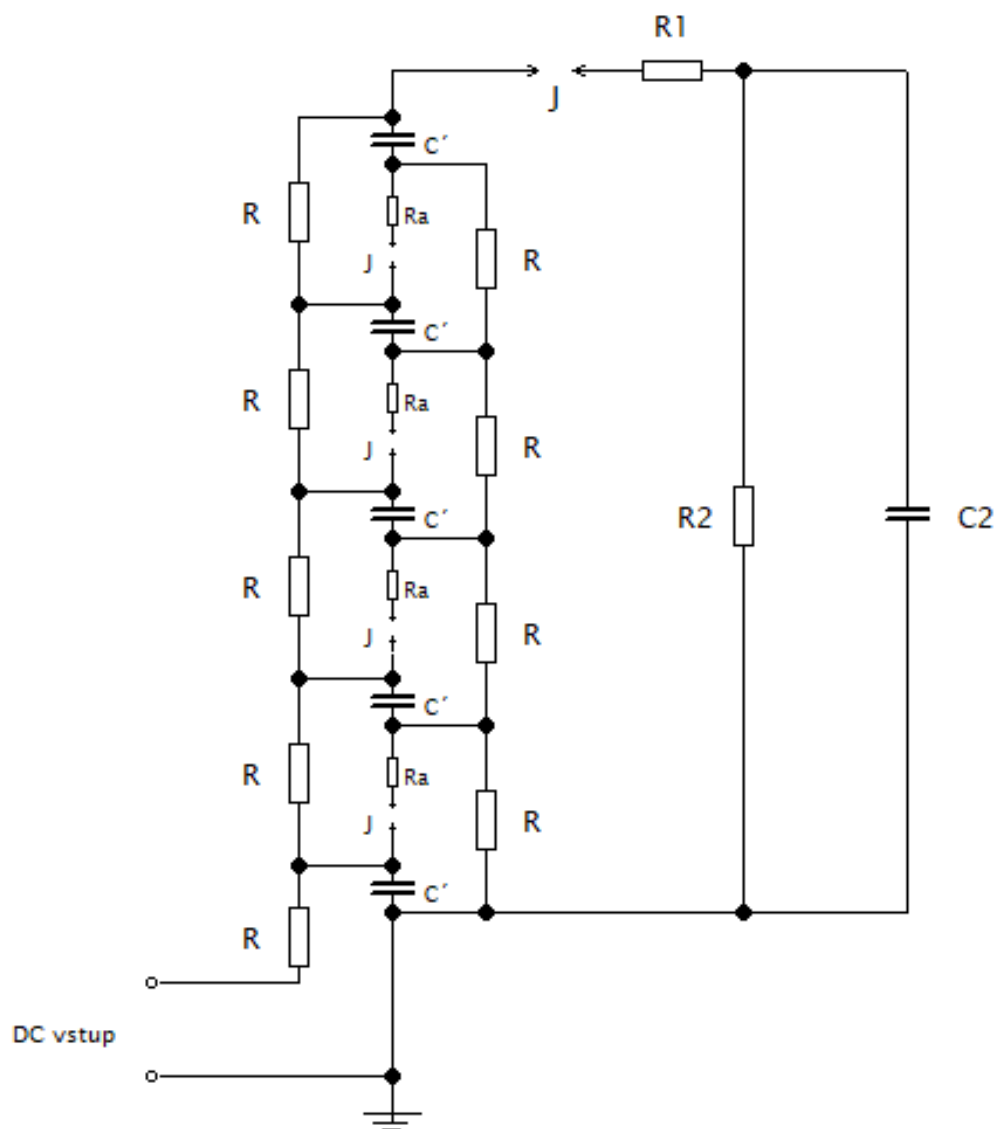
Lze přepsat do tvaru

$$u_2(t) = U_1 k (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (1.15)$$

Výsledný tvar napěťového impulsu určují časové konstanty τ_1 a τ_2 .

1.2 Vícetupňový rázový generátor napětí

Pro zkoušky velmi vysokým napětím se používají vícetupňové rázové generátory napětí, které se skládají z několika stupňů do série spojených kondenzátorů C' . Ty jsou nabíjeny paralelně stejnosměrným napětím U přes nabíjecí rezistory R , které mají minimální vliv na tvar rázové vlny, a jejich velikost je značně velká vzhledem k odporům R_1 , R_2 . Při nabití všech kondenzátorů C' se aktivuje první řadicí (zapalovací) jiskřiště J . K aktivaci tohoto jiskřiště se obvykle dosáhne přivedením zapalovacího impulsu na jeho pomocnou elektrodu (trigatron). Jakmile dojde k aktivaci jiskřiště, kondenzátor prvního a druhého stupně se spojí do série. Druhé jiskřiště se aktivuje náhlým přepětím, které se na něm vyskytne. Tento proces se opakuje až k poslednímu stupni. Po aktivaci všech jiskřišť se napětí na kondenzátorech sečtou a následně se vybíjejí přes tlumicí odpory R_a do obvodu. Sériově spojené kondenzátory můžeme na krátký okamžik považovat za výslednou činnou kapacitu s hodnotou $C_1 = C'/n$, přičemž velikost této kapacity by měla být nejméně pětikrát až desítkrát větší než kapacita C_2 , zahrnující kapacitu zkoušeného předmětu, kapacitu úpravou a vedlejší kapacity. Tato kapacita obsahuje například kapacitu rezistoru, konstrukce generátoru, popřípadě kapacitu jednotlivých stupňů proti zemi [1; 2].



Obr. 1-2 Možné schéma zapojení vícestupňového rázového generátoru napětí

2 ELEKTRICKÉ NAMÁHÁNÍ

Elektrická zařízení, která jsou bezprostředně součástí rozvodu a přenosu elektrické energie vysokým, velmi vysokým a zvláště vysokým napětím, jsou v provozu vystavena dvěma druhům elektrického namáhání. Prvním z nich je namáhání provozním napětím, na které je zařízení naddimenzováno a jemuž je vystaveno v provozu. Druhé namáhání je amplitudově větší, než je namáhání provozní, toto namáhání nazýváme přepětí a trvá pouze po určitý krátký okamžik. Přepětí lze rozdělit podle původu vzniku na vnitřní a vnější. Dle časového průběhu lze přepětí dělit na trvalé, dočasné, přechodné a kombinované. Toto rozdělení vychází z příčin, na jejichž základě vznikají. Zatímco přepětí vnitřní má periodický tlumený charakter, přepětí vnější má aperiodický charakter, který se neopakuje a tvoří impuls [2].

Impuls má aperiodický průběh a může být jak napěťový, tak proudový. Impulzy dělíme podle doby trvání na atmosférické a spínací [4].

Elektrická pevnost izolantů je závislá na tvaru impulsu. Kvůli jednotnosti zkoušek důvodu je tvar impulsu prováděný během zkoušky předepsán normou [1; 2].

2.1 Atmosférický impuls napětí

Atmosférické impulsy jsou podle literatury [2] impulsy s dobou čela do 20 μs . Tato impulzní napětí napodobují namáhání vnějším přepětím, která se v elektrických sítích projevují:

- a) Přímým úderem blesku do vodiče vedení;
- b) Nepřímým úderem blesku, který naindukují svým elektromagnetickým polem přepětí na vedení (bývá mnohem častější než přímý úder blesku).

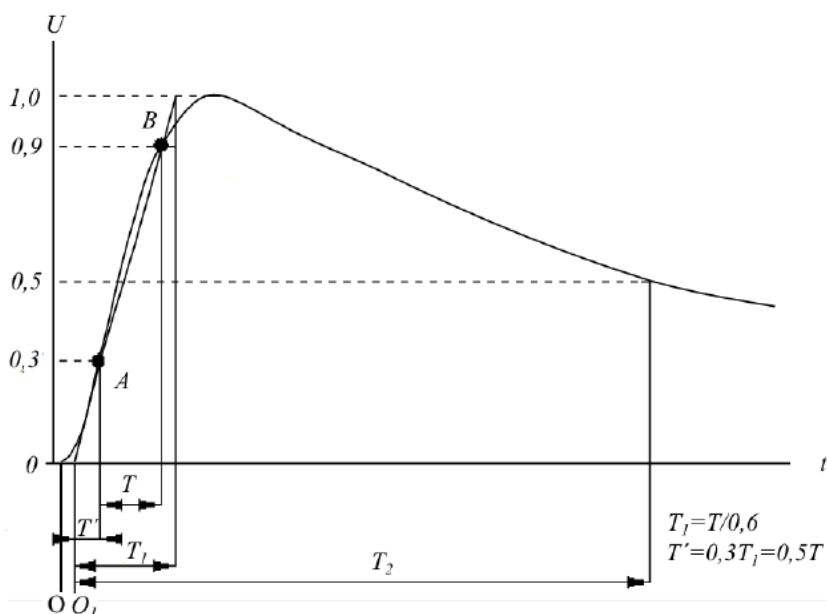
Jedná se o záměrně aplikovaný impuls, který rychle stoupá na maximální hodnotu a poté relativně pomalu klesá. Je charakteristický tvarem, polaritou, vrcholovou hodnotou a dobou trvání [2;3].

2.1.1 Plný atmosférický impuls napětí

Napěťový impuls, který není přerušen přeskokem nebo průrazem, se nazývá plný atmosférický impuls Obr. 2-1. Dle normy musí plný atmosférický impuls splňovat dané časové parametry (doba čela T_1 a doba půltýlu T_2). Doba čela vlny je zdánlivý interval normou předepsaný jako 1/0,6 násobek časového intervalu T . Tento interval se podle Obr. 2-1 nachází mezi body A a B, rovná se 30 % a 90 % vrcholové hodnoty napětí. Doba půltýlu je časový interval, který je vymezen zdánlivým počátkem O_1 a určitým bodem v týlu vlny. Tímto bodem je okamžik, kdy se napětí sníží na polovinu vrcholové hodnoty napětí. Poměr T_1/T_2 s určitými tolerancemi definuje plný normalizovaný atmosférický impuls s dobou čela 1,2 μs a dobou půltýlu 50 μs . Interval T' vymezuje počátek impulsu napětí. Je to okamžik, ve kterém impuls dosáhne 30 % vrcholové hodnoty napětí [1;4].

Dovolené tolerance stanovené normou pro atmosférický impuls:

- vrcholová hodnota $\pm 3 \%$
- doba čela $\pm 30 \%$
- doba půltýlu $\pm 20 \%$



Obr. 2-1 Plný atmosférický impulz (převzato z [4])

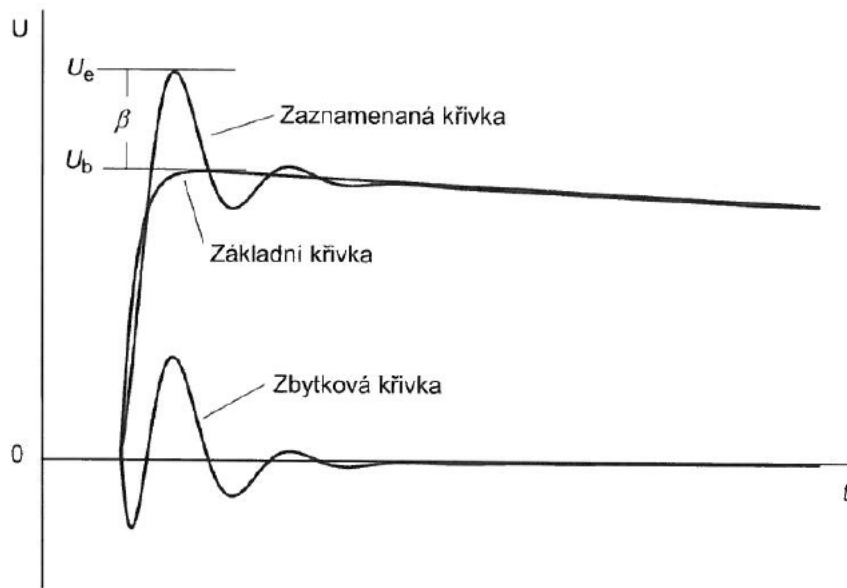
Za určitých podmínek nám však plný atmosférický impulz nesplňuje dovolené tolerance. Nejčastěji to bývá způsobeno prvkem s vysokou indukčností zapojeným do zkoušeného obvodu, který může mít za následek oscilace, které se obvykle pohybují na kmitočtu od 0,1 MHz až 2 MHz a nacházejí se v okolí vrcholu vlny. Tyto oscilace se označují jako překmit napětí. Na Obr. 2-2 můžeme vidět velikost překmitu β , který značí rozdíl mezi krajními hodnotami zaznamenané křivky U_e a vrcholovou hodnotou základní křivky U_b . Relativní velikost překmitu β' značí poměr velikosti překmitu vůči krajní hodnotě. Udává se v procentech a nesmí překročit 10 % za podmínek, že není jinak stanoven příslušnou technickou komisí [4].

Výpočet velikosti překmitu:

$$\beta = U_e - U_b \text{ [V]} \quad (2.1)$$

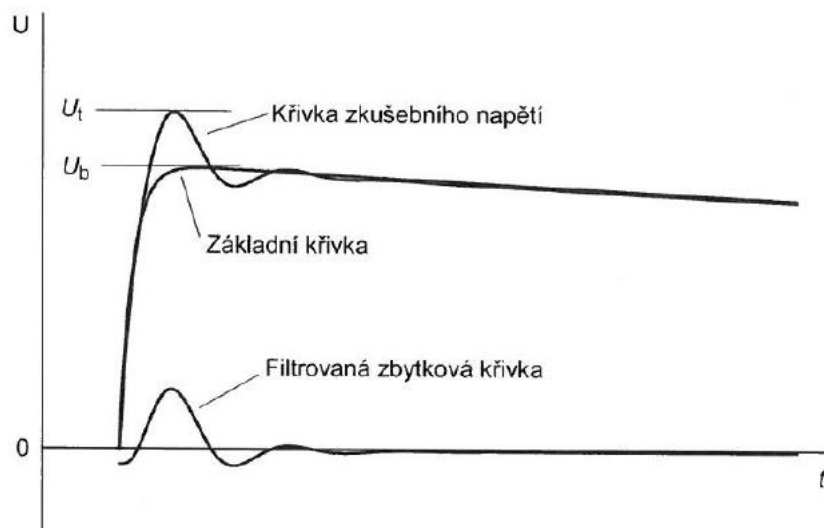
Výpočet relativní velikosti překmitu:

$$\beta' = \frac{U_e - U_b}{U_e} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.2)$$

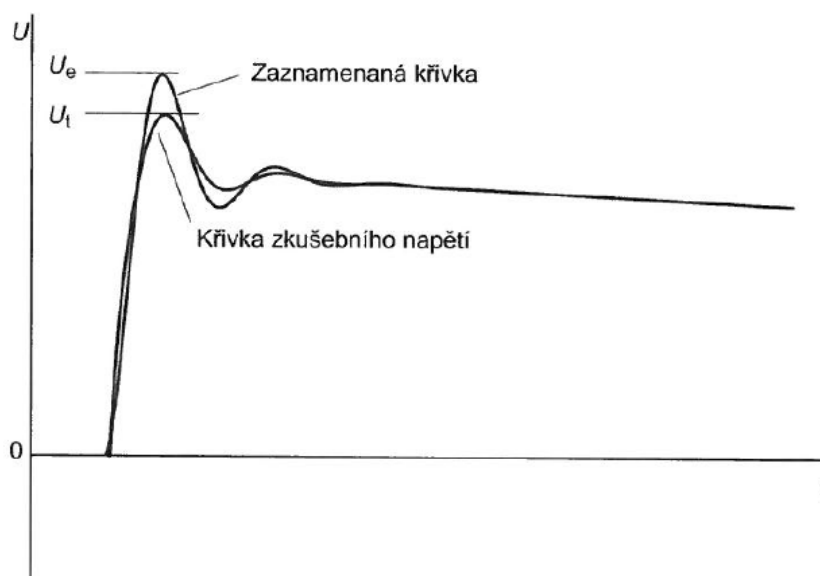


Obr. 2-2: Průběh základní a zaznamenané křivky s překmitem a zbytkovou křivkou (převzato z [4])

Ke korekci a zmenšení celkové velikosti překmitu používáme funkci zkušebního napětí $k(f)$. Jedná se o amplitudově-kmitočtovou funkci, která představuje odezvu izolace na impulzy s překmitem. Při použití této funkce na zbytkovou napěťovou křivku dosáhneme toho, že můžeme vypočítat hodnoty zkušebního napětí, které se rovná plnému atmosférickému impulzu [2].



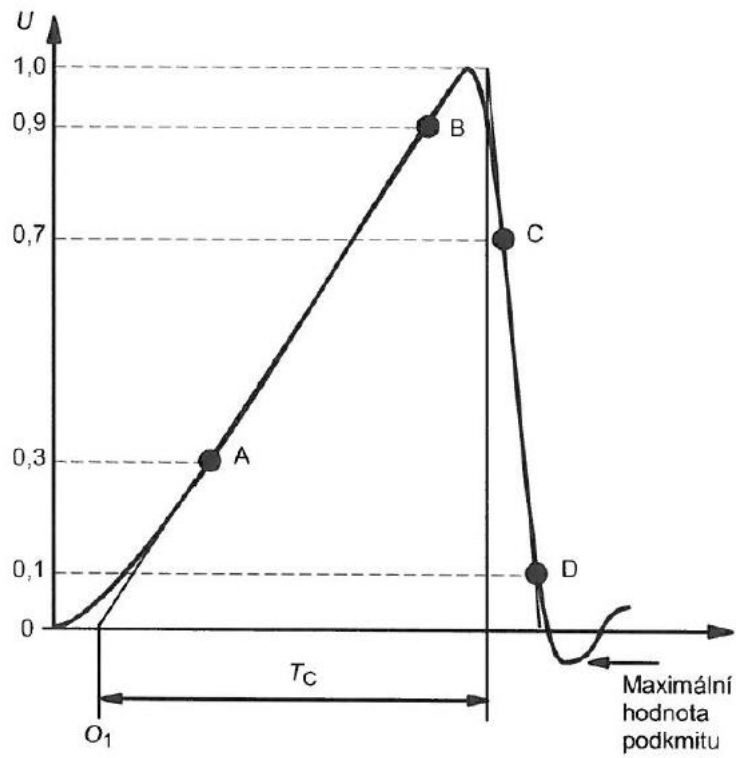
Obr. 2-3: Průběh zkušebního napětí (převzato z [4])



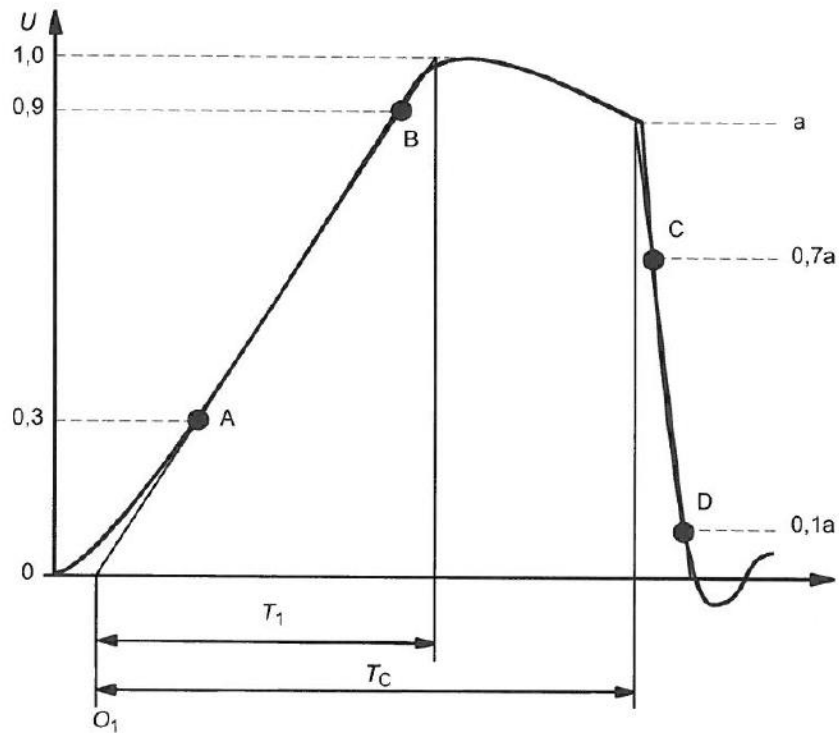
Obr. 2-4: Průběh zaznamenané a zkušební křivky (převzato z [4])

2.1.2 Useknutý atmosférický impulz

Jedná se o atmosférický impulz přerušný průrazem nebo přeskokem, který následně způsobí prudký pokles napětí na nulovou hodnotu s oscilacemi, nebo bez nich. Podle okamžiku, ve kterém dojde k průrazu či přeskoku, rozlišujeme useknutí buď v čele vlny Obr. 2-5, nebo v týlu vlny Obr. 2-6. Moment, v němž dojde k prudkému poklesu napětí, nazýváme okamžik useknutí. U normalizovaného useknutého atmosférického impulzu by měl tento okamžik nastat po $2 \mu\text{s}$ až $5 \mu\text{s}$. S tímto parametrem souvisí i doba do useknutí T_c , která vymezuje časový interval mezi zdánlivým počátkem O_1 a okamžikem useknutí. Dále zavádíme dobu zhroucení napětí během useknutí (viz Obr. 2-7) Tento parametr je normou předepsán jako $1/0,6$ časového intervalu, který je vymezen body C a D v 70 % a 10 %. Časový interval vymezený pro dobu zhroucení by měl být mnohem menší než doba čela impulzu [4].



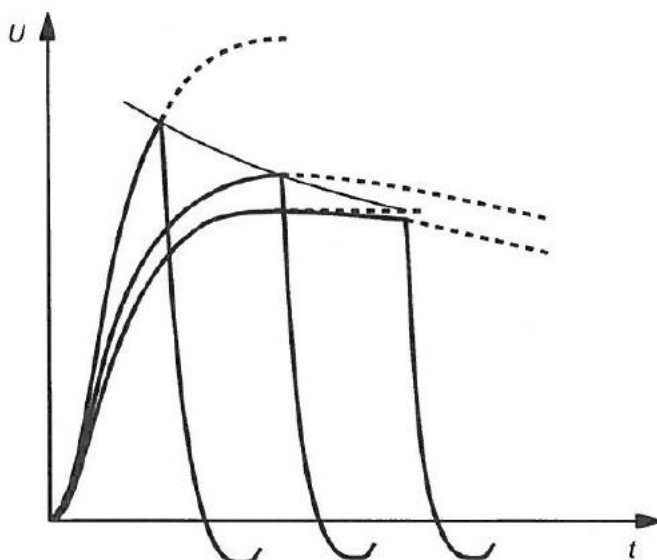
Obr. 2-5: Atmosférický impulz useknutý v čele vlny (převzato z [4])



Obr. 2-6: Atmosférický impulz useknutý v týlu vlny (převzato z [4])

2.1.3 Voltsekundová charakteristika

Jedná se o charakteristiku, která udává vlastnosti zkoušeného zařízení během namáhání atmosférickým impulzem. Zobrazuje závislost vrcholových hodnot napětí vůči době čela T_f . Konstrukce charakteristiky se provádí impulzy o stejných parametrech, pouze se mění vrcholová hodnota napětí. U impulzů s větší vrcholovou hodnotou napětí nastává přeskok v čele impulzu. Se snižující vrcholovou hodnotou napětí nastává přeskok až v týlu impulzu. Aby konstrukce charakteristiky na Obr. 2-7 byla možná, předpokládáme, že průběh každého impulzu bude stejný. Tento předpoklad zavádíme z důvodu různých průběhů pro tentýž testovaný objekt. Rozdílnost průběhů je způsobena dobou trvání impulzu, který je závislý na tvaru a polaritě. Konstrukce voltsekundových charakteristik se používá pro dimenzování ochran jednotlivých částí sítě [1;4].



Obr. 2-7: Voltsekundová charakteristika pro impulzy s konstantním předpokládaným tvarem (převzato z [4])

2.2 Spínací impulz napětí

Spínací impulzy se od atmosférických impulzů liší dobou čela impulzu. Spínací impulzy jsou impulzy s dobou čela přes $20 \mu\text{s}$. Jimi se napodobují vnitřní přepětí, která se v elektrických sítích vyskytují při:

- vypínání zkratů,
- zemních spojích v trojfázových soustavách,
- vypínání malých indukčních proudů,
- spínání kapacitních proudů.

Průběh spínacího impulzu Obr. 2-8 je odlišný od atmosférického. Na rozdíl od atmosférického impulzu má plynulý nárůst na maximální hodnotu napětí a poté pomalu klesá. Impulz začíná ve skutečném počátku O . Je to okamžik, kdy se impulz začne monotónně zvyšovat, nebo snižovat. Časový interval, který je vymezen skutečným počátkem a okamžikem, kdy napětí dosáhne maximální hodnoty, se nazývá doba do vrcholu T_p . Stanovení této doby může být obtížné vzhledem k dlouhému trvání maximálního napětí. Parametr T_2 se nazývá doba

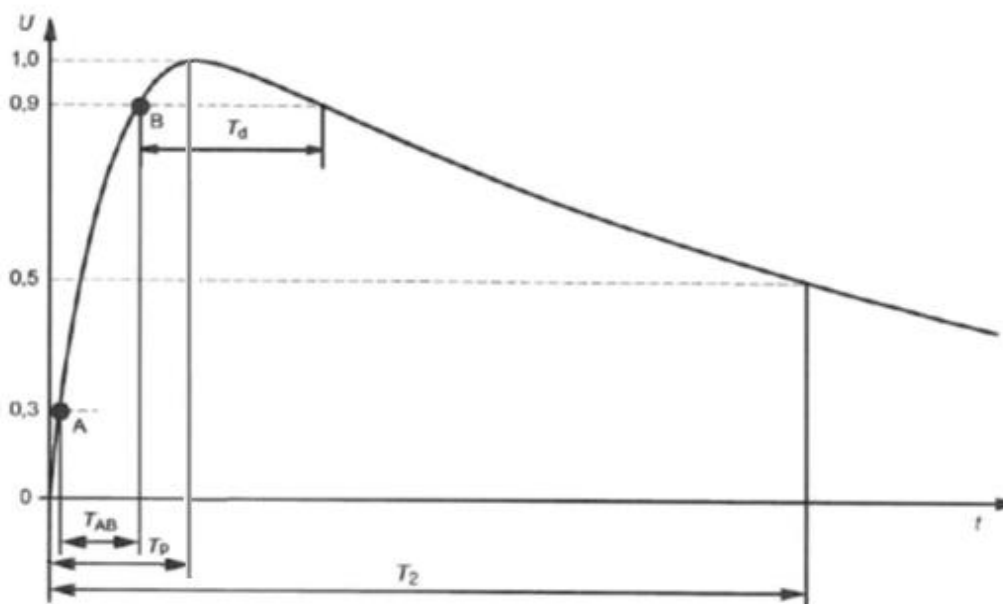
půltýlu. Je vymezen skutečným počátkem a okamžikem, kdy napětí klesne na poloviční hodnotu maximálního napětí. U normalizovaného spínacího impulzu se $T_2 = 2500 \mu\text{s}$. Ve vrchní části impulzu se nachází časový interval T_d , v němž má hodnota spínacího napětí vyšší hodnotu než 90 %. Doba k nule T_z je časový interval, který se nachází mezi skutečným počátkem a prvním průchodem napětí nulou [3;4].

K určení doby nad 90 % a doby k nule místo doby půltýlu je vhodné v případě, kdy průběh impulzu je určen jevy nasycení na objektu, který testujeme, nebo na zkoušeném obvodu. Vztahuje se také na významné vnitřní části izolace zkoušeného objektu, která je silně závislá na těchto parametrech. Pro průběh spínacího impulzu napětí je obecně stanovena jedna sada parametrů. Zejména časové parametry by měly být jasně stanoveny referencemi [4].

Normalizovaný spínací impulz napětí je označen jako 250/2500, kde doba do vrcholu $T_p = 250 \mu\text{s}$ a doba půltýlu $T_2 = 2500 \mu\text{s}$ [4].

Dovolené tolerance stanovené normou pro plný spínací impulz:

- Vrcholová hodnota $\pm 3 \%$
- doba do vrcholu $\pm 20 \%$
- doba půltýlu $\pm 60 \%$



Obr. 2-8: Spínací impulz napětí (převzato z [4])

3 ZKOUŠKY A ZKUŠEBNÍ POSTUPY

Kapitola čerpá ze zdroje [4]. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1., pro zkoušky atmosférickými a spínacími impulzy používáme rázové generátory. Zkoušky se provádějí v laboratořích vysokého napětí za určitých atmosférických podmínek. Postup zkoušky závisí na charakteru testovaného zařízení a také může být specifikován příslušnou technickou komisí. Testované zařízení musí být kompletní, funkční a mělo by odpovídat zařízení používanému ve skutečném provozu.

Pro měření parametrů vlny, oscilací, překmitů atd. jsou používány schválené měřicí systémy, stanovené IEC 60060-2. Tvar a parametry impulzu se kontrolují u každého zkoušeného objektu.

3.1 Dělení zkoušek z hlediska atmosférických podmínek

Před započítím zkoušky by měl být testovaný objekt aklimatizován na okolní atmosférické podmínky, z jejich hlediska dělíme zkoušky za sucha, za mokra a zkoušky umělým znečištěním.

3.1.1 Zkouška za sucha

Jedná se o nejjednodušší a nejčastěji používané prostředí. Referenční normalizovaná atmosféra během těchto zkoušek je:

- Teplota $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Absolutní tlak $p_0 = 1013 \text{ hPa (1013 mbar)}$
- Absolutní vlhkost $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

Během zkoušky se musí vždy uvést atmosférické podmínky, při kterých byla zkouška provedena. Zkouška se vždy neprovádí při referenčních normalizovaných atmosférických podmínkách, proto používáme tzv. korekční činitel K_t , jenž je dán součinem korekčního činitele na hustotu vzduchu k_1 a korekčního činitele na vlhkost vzduchu k_2 .

$$K_t = k_1 \cdot k_2 \quad (3.1)$$

Korekční činitel se neuplatňuje pro přeskok po povrchu, pouze pro přeskok ve vzduchu. Při normalizovaném postupu za použití korekčního činitele se měřené napětí, které proběhlo za určitých atmosférických podmínek U , může přepočítat na napětí referenčních normalizovaných atmosférických podmínek U_0 .

$$U_0 = \frac{U}{K_t} \quad (3.2)$$

V opačném případě, kdy máme při zkoušce definované napětí referenčních normalizovaných atmosférických podmínek U_0 , musíme přepočítat na příkládané napětí aktuálních atmosférických podmínek U .

$$U = U_0 \cdot K_t \quad (3.3)$$

3.1.2 Zkouška za mokra

Tato zkouška má simulovat vliv deště na vnější izolaci. Testované zařízení je ostříkáváno vodou takovým způsobem, aby bylo ostříkáváno stejně jak horizontálně, tak vertikálně v určitých tolerancích. Voda má předem stanovené hodnoty elektrické vodivosti a teplotu viz Tab. 3-1.

Tab. 3-1 Parametry deště pro normalizovaný postup (převzato z [4])

Parametry deště	Jednotky	Rozsah
Průměrná intenzita všech měření:		
- vertikální složka	(mm/min)	1,0 až 2,0
- horizontální složka	(mm/min)	1,0 až 2,0
Meze pro jednotlivá měření pro každou složku	(mm/min)	$\pm 0,5$ od průměru
Teplota vody	(°C)	teplota okolí ± 15
Měrná elektrická vodivost vody	($\mu\text{S/cm}$)	100 ± 15

Voda daných parametrů je sprejována nepřetržitě na testované zařízení 15 minut před započítáním zkoušky. Je možné použít neupravenou vodu z vodovodu, která by byla sprejována po dobu 15 minut na testovaný objekt. Poté by však muselo následovat druhé sprejování již upravenou vodou o určitých parametrech. Tento proces probíhá bez přerušení zadeštění.

Zkouška za mokra musí mít stejný postup jako zkouška za sucha, a to v případě, že příslušná technická komise nespécifikuje postup zkoušky jinak.

Pro korekci atmosférických podmínek se používá pouze korekční činitel na hustotu vzduchu k_I .

3.1.3 Zkoušky umělým znečištěním

Těmito zkouškami se snažíme simulovat použití testovaného zařízení v určitých lokalitách za určitých atmosférických podmínek. Jedná se o jedny z nejtěžších zkoušek z důvodu složité simulace konkrétních provozních podmínek. Z tohoto důvodu tyto zkoušky nemusí přesně simulovat provozní podmínky.

3.2 Zkoušky atmosférickými impulzy

Pro zkoušky atmosférickými impulzy praktikujeme zkoušky výdržným napětím a zkoušky zaručeného napětí průrazného výboje.

Dovolené tolerance normalizovaného atmosférického impulzu jsou uvedeny v 2.1.1.

3.2.1 Zkoušky výdržným napětím

U zkoušek výdržným napětím používáme čtyři různé zkušební postupy. Tyto postupy jsou A, B, C, D. Doba trvání výdržné zkoušky je předem stanovena technickou komisí podle charakteru zkoušeného objektu. Není-li příslušnou komisí tato doba určena, je stanoveno 60 s.

1. Zkušební postup A

Testované zařízení je podrobeno třem impulzům o předem stanovené hladině výdržného napětí, určitém tvaru a polaritě. Testované zařízení úspěšně splní zkoušku, zda nedojde k jeho porušení. Identifikace poruch na testovaném zařízení je dána příslušnou technickou komisí.

2. Zkušební postup B

Testované zařízení je podrobeno patnácti impulzům o předem stanovené hladině výdržného napětí, o určitém tvaru a polaritě. Testované zařízení úspěšně splní zkoušku v případě, že nedojde k více než dvěma průrazným výbojům v oblasti samočinně se obnovující izolace, a není-li

nalezena porucha samočinně se neobnovující izolace. Jeden z možných identifikátorů toho, že samočinně se neobnovující izolace není porušena, je to, že během posledních tří impulzů nedošlo k průraznému výboji. Jestliže během posledních tří impulzů k průraznému výboji došlo, může být testované zařízení podrobena dalším 3 impulzům navíc. Za podmínky, že nedojde k dalšímu průraznému výboji, testované zařízení prošlo zkouškou.

3. Zkušební postup C

Testované zařízení je podrobena patnácti impulzům o předem stanovené hladině výdržného napětí, určitém tvaru a polaritě a úspěšně splní zkoušku v případě, že nedojde k žádnému průraznému výboji. Jestliže dojde k průrazu v části samočinně se obnovující izolace, testované zařízení je podrobena dalším devíti impulzům. Nedojde-li k průraznému výboji, testované zařízení úspěšně prošlo zkouškou. Testované zařízení nesplní zkoušku v případě, že dojde k poruše samočinně se neobnovující izolace.

4. Zkušební postup D

U tohoto postupu se musí použít několik napěťových hladin, kterým je testované zařízení podrobena na rozdíl od předchozích postupů, kde se mění pouze výdržná hodnota napětí.

Použitím statických zkušebních postupů můžeme vyhodnotit 10 % napětí průrazného výboje U_{10} , jedná-li se o samočinně obnovující se izolaci. Můžeme přímo vyhodnotit U_{10} a U_{50} nebo nepřímou U_{10} dle následujícího vztahu:

$$U_{10} = U_{50} \cdot (1 - 1,3s) \quad (3.4)$$

Příslušná technická komise musí předem stanovit předpokládanou hodnotu směrodatné odchylky napětí průrazného výboje s . Hodnota směrodatné odchylky je závislá na charakteru testovaného objektu a na okolních podmínkách, při kterých zkouška probíhá. V případě, že je zkouška provedena za sucha a izolačním materiálem je vzduch, lze použít hodnotu směrodatné odchylky $s = 0,03$. Zkoušené zařízení splní úspěšně zkoušku v případě, kdy U_{10} není menší než stanovené výdržné impulzní napětí.

K vyhodnocení U_{50} používáme následující dvě metody.

a) Metoda více hladin

Jedná se o zkoušky třídy 1. Během zkoušky se přikládá např. atmosférické impulzní napětí n_i , které způsobí $k_i \leq n_i$ průrazných výbojů na každé z napěťových hladin U_i .

b) Metoda nahoru – dolů

Jedná se o zkoušku třídy 2. Zkouška spočívá v přikládání skupin namáhání n , které jsou vystaveny napěťovým hladinám U_i . Napěťová hladina se s každou následující skupinou namáhání mění o ΔU podle toho, jak vyhověla předchozí skupina namáhání. U této metody se běžně využívají dva zkušební postupy.

Prvním z těchto postupů je postup výdržný. Postup spočívá v hledání takových napěťových hladin U_i , aby byla zajištěna malá pravděpodobnost průrazného výboje.

Druhý z postupů je výbojový postup, který je přesným opakem výdržného postupu. Postup spočívá v hledání takových napěťových hladin U_i , kdy je vysoká pravděpodobnost průrazného výboje.

Jestliže oba uvedené postupy mají počet impulzů na skupinu $n = 1$, blíží se zkoušce nahoru – dolů 50% napětím průrazného výboje.

Zdroj [2] říká: „Ve všech případech by měl být rozsah mezi hladinami ΔU v rozsahu od 1,5 % do 3 % odhadované hodnoty U_{50} .“

Metodu nahoru – dolů můžeme použít i pro vyhodnocení U_{10} s počtem impulzů $n = 7$ a několika platnými skupinami.

3.2.2 Zkoušky zaručeného napětí průrazného výboje

Postupy u těchto zkoušek jsou podobné postupům u zkoušek výdržným napětím. Jediné rozdíly jsou pozměněné výboje a výdržné podmínky.

3.3 Zkoušky spínacími impulzy

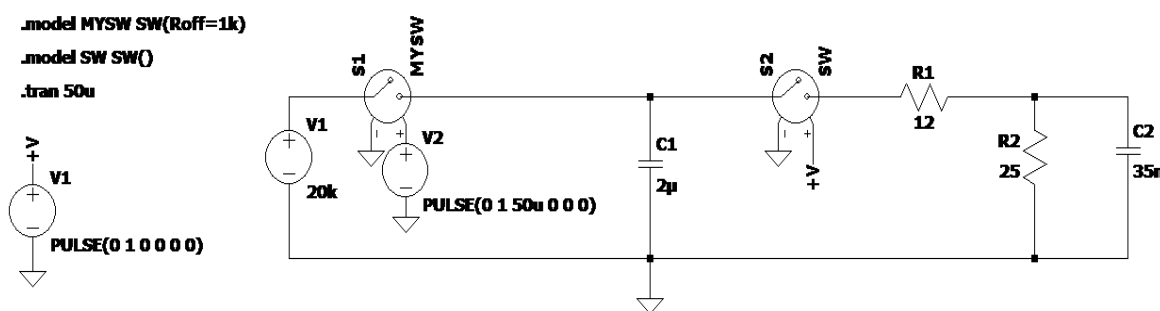
Dovolené tolerance normalizovaného spínacího impulzu jsou uvedeny v 2.2. Zkušební postupy u spínacích impulzů jsou stejné jako u atmosférických impulzů.

4 SIMULACE PRŮBĚHŮ

Kapitola 4 čerpá ze zdroje [6]. K simulaci průběhů budeme využívat programu LTspice. Jedná se o freeware program, který byl vyvinut pro modelování spínacích regulačních systémů. Program se skládá ze tří základních částí: grafického editoru, který nám umožňuje vytvořit libovolné schéma; výkonného Spice simulátoru; postprocesoru, který nám umožňuje vizualizovat výsledné průběhy.

4.1 Ověření simulace pomocí matematických výpočtů

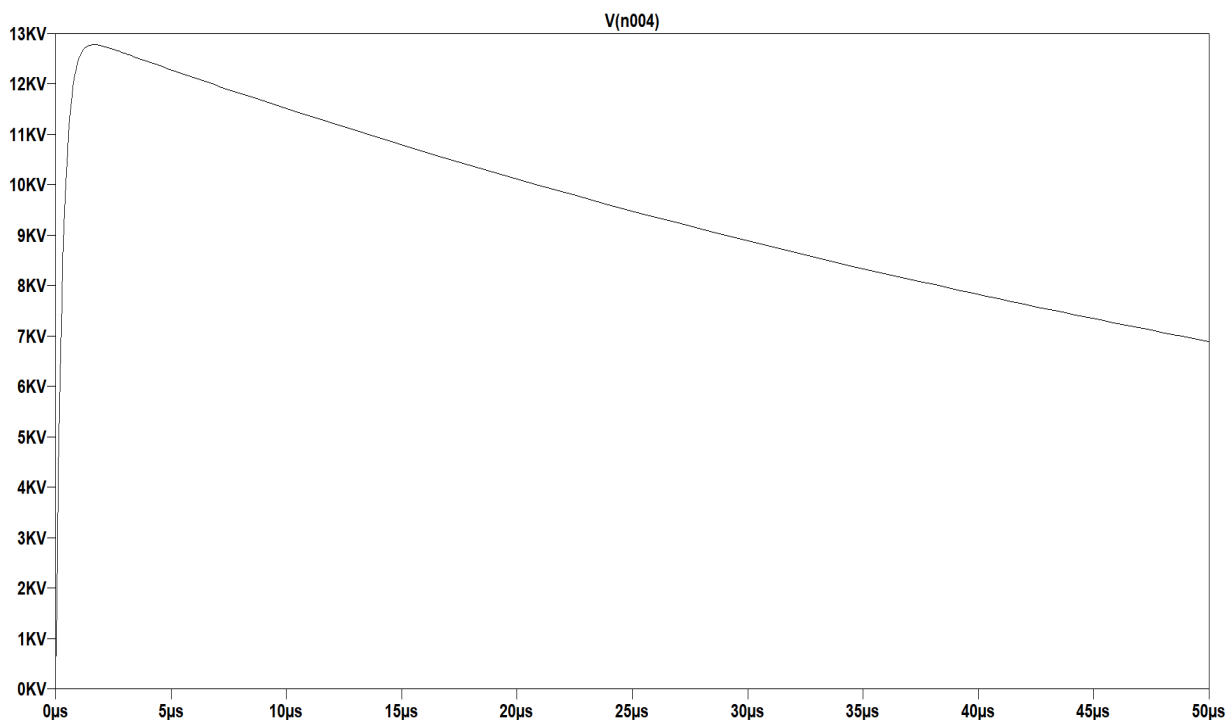
V programu LTspice byl pro toto ověření vytvořen model jednostupňového rázového generátoru. Schéma zapojení je možné vidět na Obr. 4-1. Schéma obsahuje stejnosměrný zdroj V1 s hodnotou napětí 20 kV. Za zdrojem se nachází řízený napěťový spínač MYSW S1, který je ovládán pomocí pulsního zdroje. Tento spínač má za funkci odpojení zdroje napětí. Druhý spínač SW S2 představuje jiskřiště. Model nadále obsahuje prvky: činnou kapacitu C₁ o velikosti 2 μF, zatěžovací kapacitu C₂ o velikosti 35 nF, čelní odpor R₁ o velikosti 12 Ω a týlní odpor R₂ o velikosti 25 Ω.



Obr. 4-1 Schéma jednostupňového rázového generátoru

Dále je možné vidět vedle schématu zapojení příkazy pro řízení simulace (`.tran 50u`, `.model SW SW ()`, `model MYSW SW(Roff=1k)`). Příkaz `.tran 50u` představuje příkaz pro analýzu přechodných dějů. Tento příkaz zaručuje, že program LTspice provede přechodnou analýzu o délce 50 μs. Příkaz `.model SW SW ()` je model, bez něhož by spínač nemohl fungovat. Příkaz `.model MYSW SW(Roff=1k)` zaručuje odpojení napájecího zdroje. Tento příkaz byl nutný pouze u zapojení jednostupňového rázového generátoru. Jeho účelem bylo zamezit vložení dalšího prvku (nabíjecího rezistoru), aby bylo možné použít výše uvedené rovnice pro výpočet výstupního napětí a aby tak nedošlo k jeho ovlivnění. Roff představuje parametr doplňující model. Jedná se o hodnotu odporu ekvivalentního rozepnutého spínače. Je-li tato hodnota vynechána, používáme model ideálního spínače, jako je to v případě SW S2.

Následně byla provedena simulace, jejíž průběh je možné vidět na Obr. 4-2. Z tvaru výstupního napětí je možné usoudit, že se jedná o atmosférický impulz. Napětí prudce stoupá k vrcholové hodnotě a následně pozvolna klesá.



Obr. 4-2 Průběh výstupního napětí jednostupňového rázového generátoru

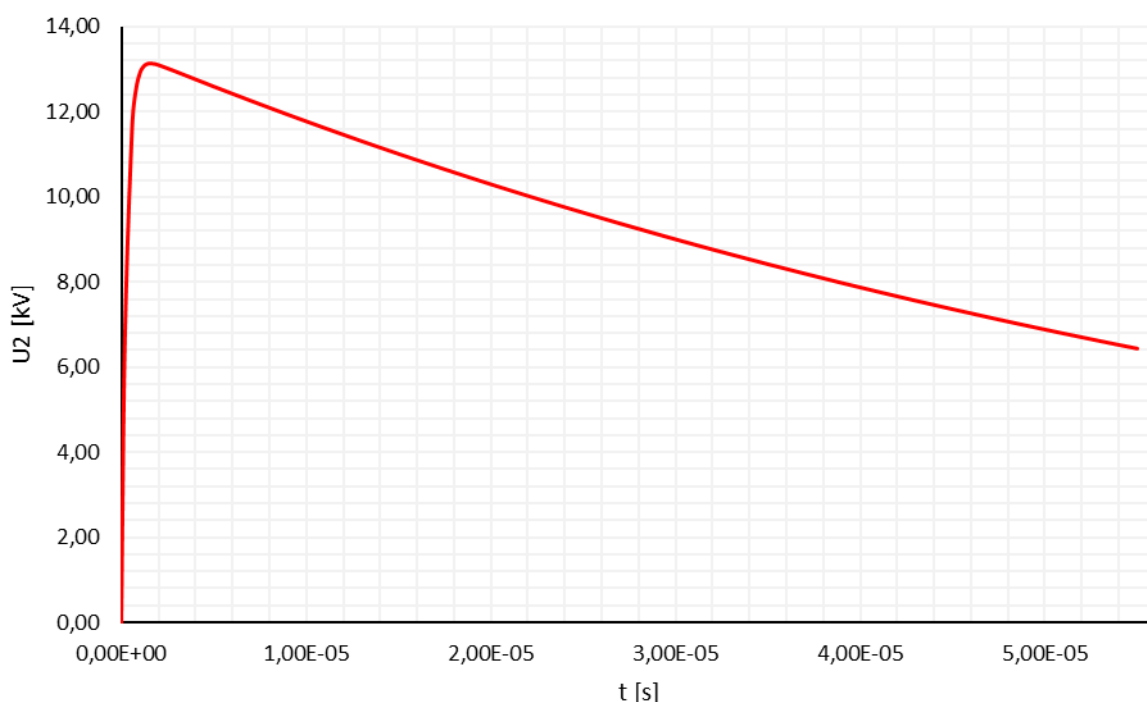
Dále jsme ověřili, zda simulované výstupní napětí splňuje dovolené tolerance stanovené normou pro atmosférický impulz. Naměřené hodnoty simulovaného průběhu můžeme vidět v Tab. 4-1

Tab. 4-1 Změřené a vypočtené hodnoty výstupního napětí pro jednostupňový rázový generátor

U_2 [kV]	U_{90} [kV]	U_{50} [kV]	U_{30} [kV]	t_{100} [μ s]	t_{90} [μ s]	t_{30} [μ s]	T [μ s]	T_1 [μ s]	T_2 [μ s]
12,78	11,50	6,39	3,83	1,620	0,647	0,106	0,541	0,902	55,87

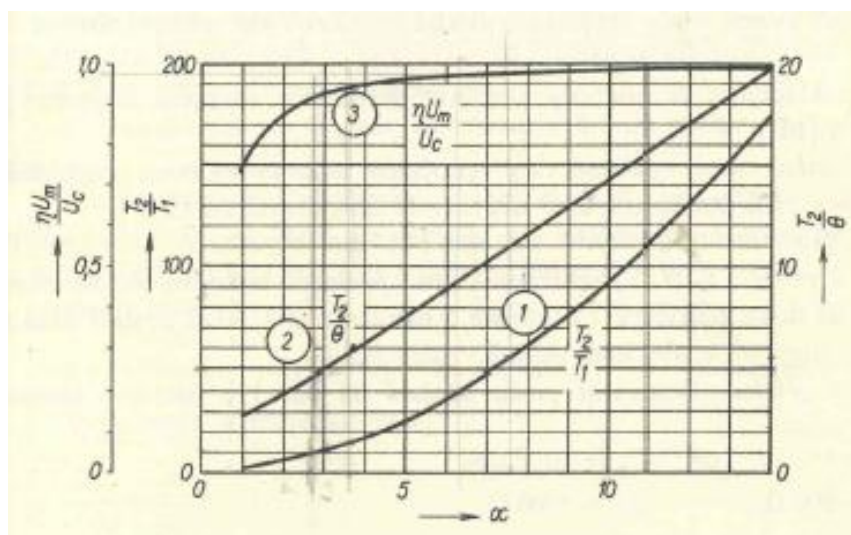
Normou stanovený atmosférický impulz má dobu čela $T_1 = 1,2 \mu$ s a toleranci $\pm 30 \%$. Časové rozmezí čela impulzu se nachází mezi $0,84 \mu$ s a $1,56 \mu$ s. Doba čela simulovaného impulzu vyšla $T_1 = 0,902 \mu$ s, to znamená, že čelo impulzu splňuje dovolenou toleranci. Doba půltýlu normalizovaného atmosférického impulzu má hodnotu $T_2 = 50 \mu$ s a toleranci $\pm 20 \%$. Časové rozmezí půltýlu impulzu se nachází mezi 40μ s a 60μ s. Z Tab. 4-1 je možné vidět, že doba půltýlu $T_2 = 55,87 \mu$ s, čímž splňuje dovolené tolerance. Simulovaný průběh tedy splňuje všechny dovolené tolerance.

Následně byla matematickým výpočtem ověřena správnost simulace. Matematický výpočet byl proveden v programu Microsoft Excel, ve kterém byl vytvořen graf výstupního napětí z vypočtených hodnot. Vzorce pro výpočet výstupního napětí jsou možné vidět v kapitole 1.1. Pomocí rovnice (1.10) byly vypočteny kořeny kvadratické rovnice α_1 a α_2 . Po dosazení do rovnice (1.12) bylo možné spočítat hodnotu výstupního napětí v různých časových intervalech. Výsledný tvar výstupního napětí získaný pomocí matematických výpočtů je možné vidět na Obr. 4-3.



Obr. 4-3 Průběh výstupního napětí určen matematickým výpočtem

Pro tento způsob zobrazení výstupního napětí není možné přesně změřit parametry vlny, jako tomu bylo v případě simulace. Pro ověření a správnost výstupního napětí byly matematicky spočítány parametry T_1 a T_2 . Pro výpočet těchto hodnot jsou použity vztahy a odvozené křivky Obr. 4-4, které vyjadřují závislosti charakteristických hodnot napěťových rázů jako funkci α .



Obr. 4-4 Hodnoty T_2/T_1 , T_2/Θ , a $\eta(U_m/U_c)$ jako funkce α (převzato z [1])

Následující vztahy udává zdroj [1]. Pro zjištění parametrů T_1 a T_2 je zapotřebí si vypočítat hodnoty parametrů Θ , η , α . Parametry η a α jsou bezrozměrné, Θ má rozměr času [μ s].

$$\Theta = \sqrt{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2} = \sqrt{2 \cdot 10^{-6} \cdot 35 \cdot 10^{-9} \cdot 12 \cdot 25} = 4,58 \cdot 10^{-6} \mu s \quad (4.1)$$

$$\eta = 1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2} = 1 + \frac{35 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 10^{-6}} + \frac{12}{25} = 1,497 \quad (4.2)$$

$$\alpha = \frac{\eta}{2} \cdot \sqrt{\frac{R_2 \cdot C_1}{R_1 \cdot C_2}} = \frac{1,497}{2} \cdot \sqrt{\frac{25 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{12 \cdot 35 \cdot 10^{-9}}} = 8,17 \quad (4.3)$$

Z křivky 1 na Obr. 4-4 odečteme poměr T_2/T_1 pro vypočtené α a z křivky 2 poměr T_2/Θ . Po vynásobení této hodnoty parametrem Θ získáme dobu půltýlu T_2 .

$$\frac{T_2}{T_1} \approx 63; \quad \frac{T_2}{\Theta} \approx 12 \quad (4.4)$$

$$T_2 \approx \Theta \cdot 12 \approx 4,58 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \approx 55 \mu s \quad (4.5)$$

$$T_1 \approx \frac{T_2}{63} \approx \frac{55 \cdot 10^{-6}}{63} \approx 0,873 \mu s \quad (4.6)$$

Tabulka 4-2 Změřené a vypočítané hodnoty výstupního napětí určeného matematickým výpočtem

U_2 [kV]	T_1 [μs]	T_2 [μs]
13,12	0,873	55

Při porovnání výstupních hodnot simulovaného průběhu s matematicky vypočteným průběhem jsou možné vidět malé rozdíly. Při výpočtu doby čela a doby půltýlu mohlo dojít k chybě během odečítání z Obr. 4-4, kdy i menší odchylka má velký vliv na výsledné hodnoty. Vrcholové hodnoty napětí se také liší přibližně o 340 V. Tento rozdíl byl způsoben příkazem *.model MYSW SW (Roff=1k)*. Příkaz způsobuje zkreslení výsledků vůči výpočtům. Při pokusech eliminovat tuto chybu docházelo k ustálení napětí ve vrcholové hodnotě napětí. Tento příkaz byl pro funkčnost obvodu použit pouze u jednostupňového rázového generátoru. U následujících vícešupňových schémata nebyl použit, tím pádem neměl vliv na výstupní napětí.

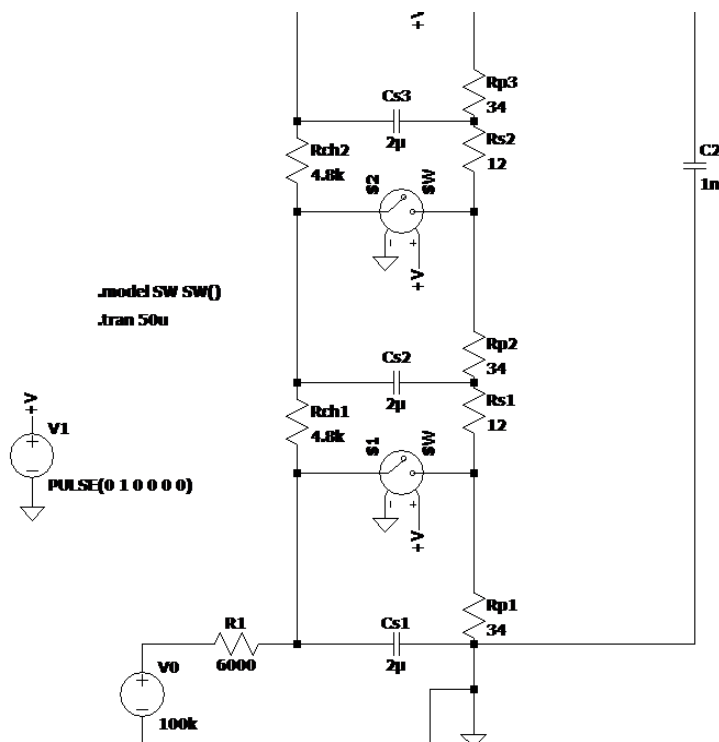
Z těchto měření můžeme usoudit, že simulace průběhů je mnohem efektivnější a jednodušší metoda oproti matematickému výpočtu. Výpočet byl proveden pro nejjednodušší zapojení rázového generátoru a přes to celkové vypočtení a získání výsledků bylo mnohem delší a složitější. Z těchto důvodů je zřejmé, že simulace jsou mnohem lepším a jednodušším řešením.

4.2 Simulace s čistě kapacitní zátěží

V programu bylo vymodelováno schéma rázového generátoru v Marxově zapojení. Z důvodu velké rozlohy celého schématu je zobrazeno na Obr. 4-5 pouze částečné schéma zapojení, na kterém jsou zobrazeny dva stupně rázového generátoru.

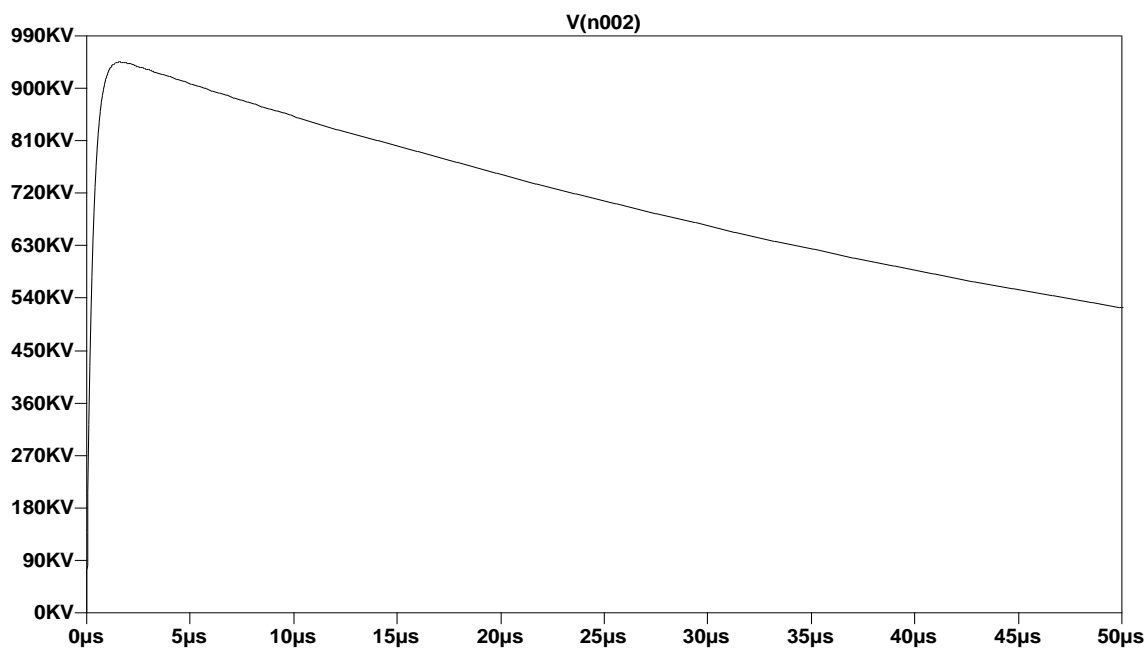
Schéma obsahuje stejnosměrný nabíjecí zdroj V0 o velikosti 100 kV. Jeden stupeň rázového generátoru obsahuje nabíjecí rezistor Rch o hodnotě 4,8 k Ω , společně s paralelním a sériovým rezistorem Rp a Rs o hodnotách 34 Ω a 12 Ω . Dále obsahuje nabíjecí kondenzátor Cs o hodnotě

2 μF . Prvek SW S1 představuje řízený napěťový přepínač, který je ovládán pomocí pulzního zdroje napětí. Odpor R_1 představuje nabíjecí rezistor o hodnotě 6 $\text{k}\Omega$.



Obr. 4-5 Částečné schéma desetistupňového rázového generátoru v programu LTspice

První simulace byla provedena s testovaným objektem, který měl čistě kapacitní charakter Obr. 4-6. Hodnota kapacity byla zvolena 1 nF. Ze simulace můžeme vidět, že průběh splňuje tvar atmosférického impulzu, jako tomu bylo u jednostupňového rázového generátoru. Jeho počátek je v 0 μs , následně napětí rychle stoupá k vrcholové hodnotě, která se rovná 943,4 kV. Po dosažení vrcholové hodnoty napětí můžeme vidět, že hodnota napětí pozvolna klesá.



Obr. 4-6 Průběh výstupního napětí rázového generátoru pro hodnotu kapacity 1nF

Dále bylo opět prověřeno, zda simulované výstupní napětí splňuje dovolené tolerance stanovené normou pro atmosférický impulz. Naměřené hodnoty simulovaného průběhu můžeme vidět v Tab. 4-3. Doba čela simulovaného impulsu vyšla $T_1 = 0,868 \mu\text{s}$, to znamená, že čelo impulsu splňuje dovolenou toleranci. Z Tab. 4-3 je možné vidět, že doba půltýlu $T_2 = 59 \mu\text{s}$, čímž splňuje dovolené tolerance. Simulovaný průběh tedy splňuje všechny dovolené tolerance.

Tab. 4-3 Naměřené a vypočítané hodnoty výstupního napětí pro kapacitu 1nF

Simulovaný průběh ($C_2=1 \text{ nF}$)								
U_2 [kV]	U_{90} [kV]	U_{30} [kV]	t_{100} [μs]	t_{90} [μs]	t_{30} [μs]	T [μs]	T_1 [μs]	T_2 [μs]
943,4	849,06	283,02	1,551	0,623	0,102	0,521	0,868	59

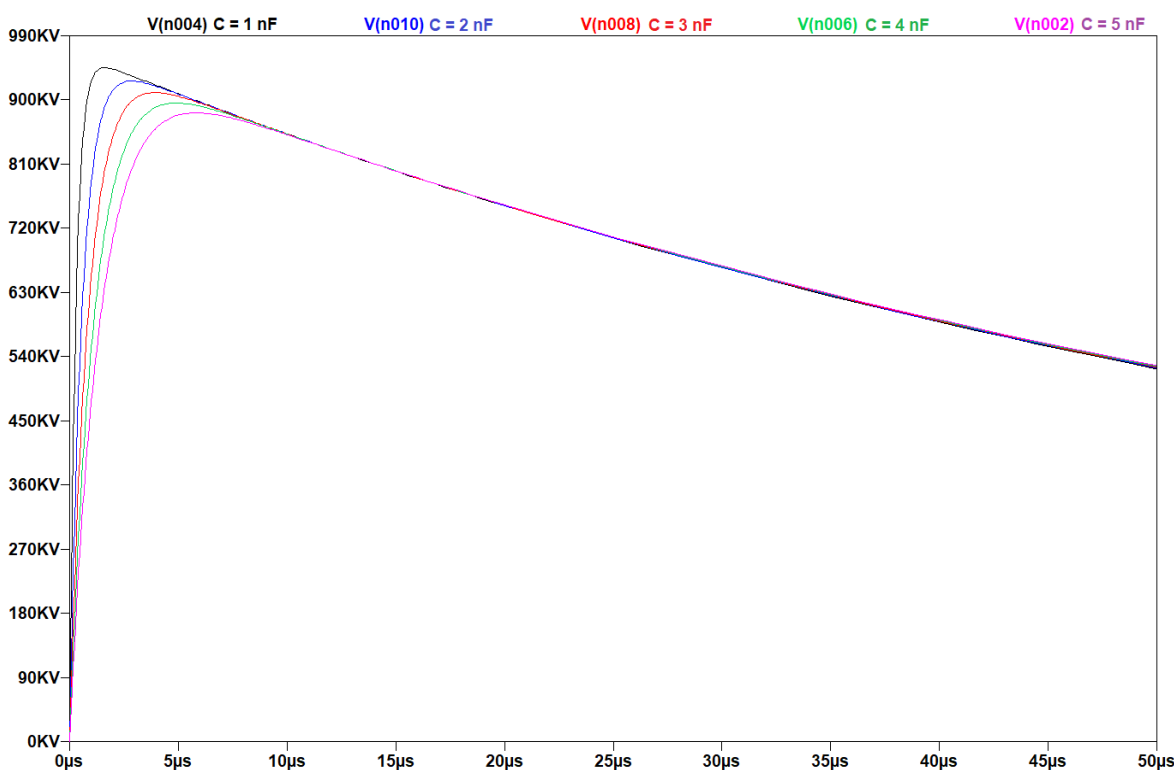
Dále jsme pro takto zapojený rázový generátor našli mezní hodnoty kapacity C_2 , kdy průběh splňoval dovolenou toleranci doby čela T_1 .

Mezní hodnoty kapacity C_2 :

$$C_{2 \text{ min}} = 0,97 \text{ nF}$$

$$C_{2 \text{ max}} = 1,85 \text{ nF}$$

V další simulaci, kterou je možno vidět na Obr. 4-7, byla měněna hodnota kapacity testovaného objektu a porovnávaly se jejich průběhy. Hodnota kapacity se pohybovala od 1 nF až do 5 nF s krokem 1 nF. Z grafu můžeme vidět, že se zvyšující se kapacitou se zmenšuje vrcholová hodnota napětí a doba čela impulsu se naopak zvětšuje.



Obr. 4-7 Průběh výstupního napětí rázového generátoru pro hodnotu kapacity 1nF až 5nF

V Tab. 4-4 je možné vidět naměřené hodnoty pro různé velikosti zátěží. Z vypočtených hodnot doby čela a doby půltýlu bylo možné ověřit, zda jednotlivé průběhy splňují normou stanovené tolerance pro atmosférický impuls. V případě zátěže o velikosti 1 a 2 nF výstupní

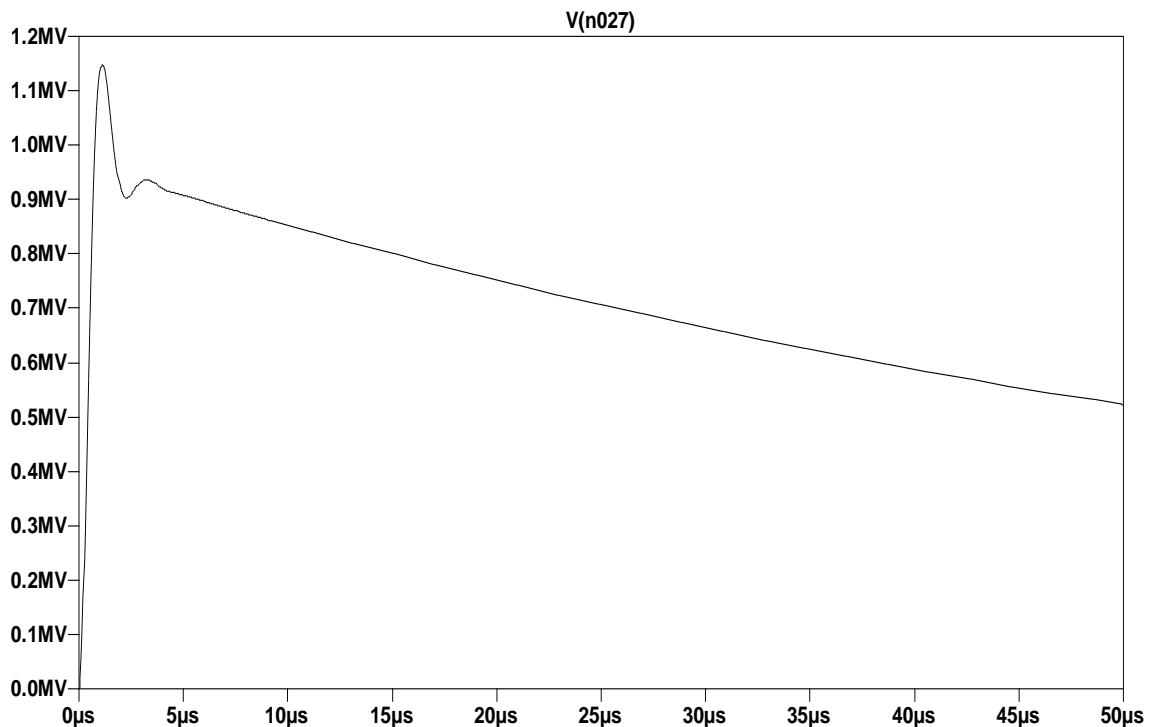
napětí vyhovuje těmto tolerancím. Se zvětšující se hodnotou zátěže jí tyto tolerance splněny nebyly.

Tab. 4-4 Změřené a vypočtené hodnoty pro různé velikosti zátěže C_2

C_2 [nF]	U_2 [kV]	T_1 [μ s]	T_2 [μ s]
1	945,1	1,293	58,9
2	926,6	1,543	60
3	910,3	2,450	62,43
4	895,4	3,118	64,96
5	881,7	3,792	66,01

4.3 Simulace s přidáním sériovou indukční složkou

Během této simulace testované zařízení představovala kapacita s hodnotou $C = 1$ nF s do série připojenou indukčností $L = 0,1$ mH. Touto simulací měl být ověřen vznik překmitů v důsledku připojení indukčního prvku. Na Obr. 4-8 můžeme vidět simulovaný průběh. Na první pohled je zřejmé, že přidaná indukčnost způsobila překmit. Impulz nabývá mnohem vyšší vrcholové hodnoty napětí, následně klesá na hodnotu napětí základní křivky a osciluje.



Obr. 4-8 Průběh výstupního napětí rázového generátoru se sériovou indukční složkou

Základní křivku nám v tomto případě představuje průběh na Obr. 4-6. V Tab. 4-5 můžeme vidět, že maximální hodnota napětí dosahovala $U_{p100} = 1147,07$ kV. Pomocí hodnot U_2 z Tab. 4-3 a U_{p2} z Tab. 4-5 si můžeme vypočítat velikost překmitu a relativní velikost překmitu pomocí vztahů (2.1) a (2.2).

Podmínka:

$$U_{p100} = U_e ; U_{100} = U_b \quad (4.7)$$

$$\beta = U_e - U_b = 1147,07 \text{ kV} - 943,4 \text{ kV} = 203,67 \text{ kV} \quad (4.8)$$

$$\beta' = \frac{U_e - U_b}{U_e} \cdot 100 = \frac{1147,07 \text{ kV} - 943,4 \text{ kV}}{1147,07 \text{ kV}} \cdot 100 = 17,76 \% \quad (4.9)$$

Z vypočtené hodnoty překmitu můžeme určit, zda průběh splňuje dovolenou toleranci pro vrcholovou hodnotu, která činí $\pm 3\%$. Vrcholová hodnota základní křivky se rovná $U_{100} = 943,4 \text{ kV}$. Napěťové rozmezí pro vrcholovou hodnotu se tedy pohybuje od $915,1 \text{ kV}$ až do $971,7 \text{ kV}$. Simulovaný průběh se sériově zapojenou indukčností tedy nesplňuje normou stanovené tolerance pro vrcholovou hodnotu, ale také pro dobu čela viz Tab. 4-5.

V případě vzniku takto velkých překmitů se v praxi uplatňuje filtrace maximální hodnoty, viz Obr. 2-4. Z důvodů příliš komplikovaných výpočtů se filtrace provádí strojově. Na filtraci vrcholové hodnoty se zaměřuje literatura [4].

Mezní hodnota sériově zapojené indukčnosti L , kdy průběh splňoval dovolenou toleranci vrcholové hodnoty je $L = 0,0324 \text{ mH}$.

Tab. 4-5 Naměřené a vypočítané hodnoty výstupního napětí pro přidanou sériově zapojenou indukčnost

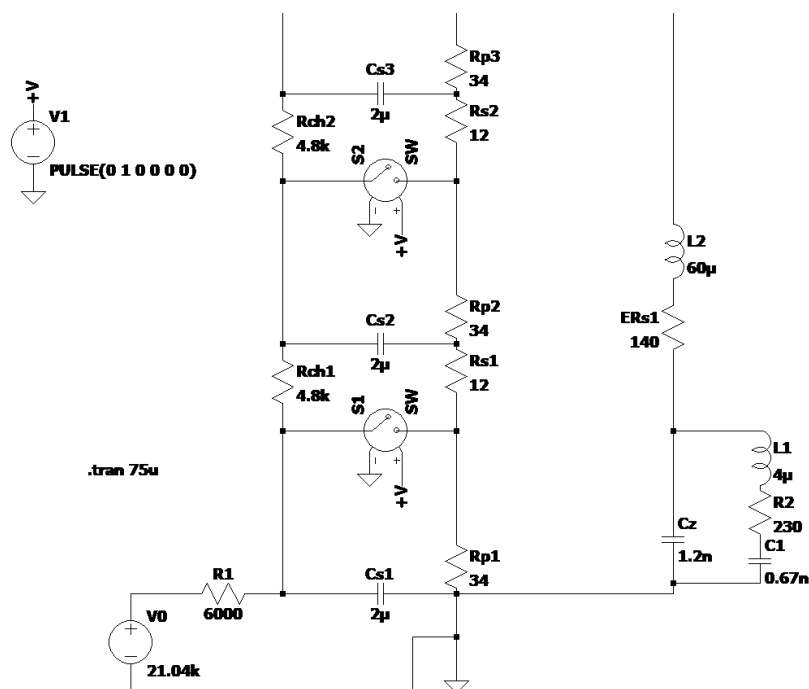
Simulovaný průběh ($C_2=1 \text{ nF}$ $L=0,1 \text{ mH}$)										
U_{p2} [kV]	U_{p90} [kV]	U_{p30} [kV]	t_{p100} [μs]	t_{p90} [μs]	t_{p30} [μs]	T [μs]	T_1 [μs]	T_2 [μs]	β [kV]	β' [%]
114 7,07	1032,363	344,121	1,09	0,804	0,319	0,485	0,808	42	203,67	17,76

4.4 Simulace pro volbu externího rezistoru

Tato simulace byla provedena pro univerzitní rázový generátor. Jedná se o desetistupňový rázový generátor s maximálním napětím na jeden stupeň 100 kV a celkovou maximální energií 100 kJ . V programu LTspice jsme vymodelovali model rázového generátoru Obr. 4-9. Jedná se o téměř totožné schéma zapojení jako v případě předchozích simulací s výjimkou přidaných parazitních prvků. Parazitní prvky jsou na schématu paralelně připojeny k zátěži, v našem případě se jedná o indukčnost L_1 , odpor R_2 a kapacitu C_1 . Dalším parazitním prvkem je sériově připojená indukčnost L_2 . Hodnoty těchto parazitních prvků byly přibližně zjištěny vedoucím této práce Ing. Luděkem Pelikánem. Přidané parazitní prvky ovlivní tvar vrcholové hodnoty výstupního napětí. Vznikne lehký překmit, který je nepříznivý, ale přijatelný.

Simulace se týkala externího rezistoru, který je připojen na vrcholu transformátoru a slouží k připojení testovaných zařízení tak, aby výstupní napětí co nejméně ovlivňovala parazitní indukčnost a minimalizoval se překmit ve vrcholu. Jedná se o rezistorový pás, s odporovými dráty vinutými v meandru tak, aby byla jeho výsledná indukčnost co nejnižší. V simulačním programu LTspice je tento odpor označen ERs1 a je připojen na usekávací jiskřiště. Jeho připojení je účelné tak, aby nám při testovaných objektech pomohl v modelování tvaru vlny.

Simulace externího rezistoru může být přínosná při navrhování samotného rázového generátoru nebo při individuálních zkouškách z důvodu složité manipulace a výměny.



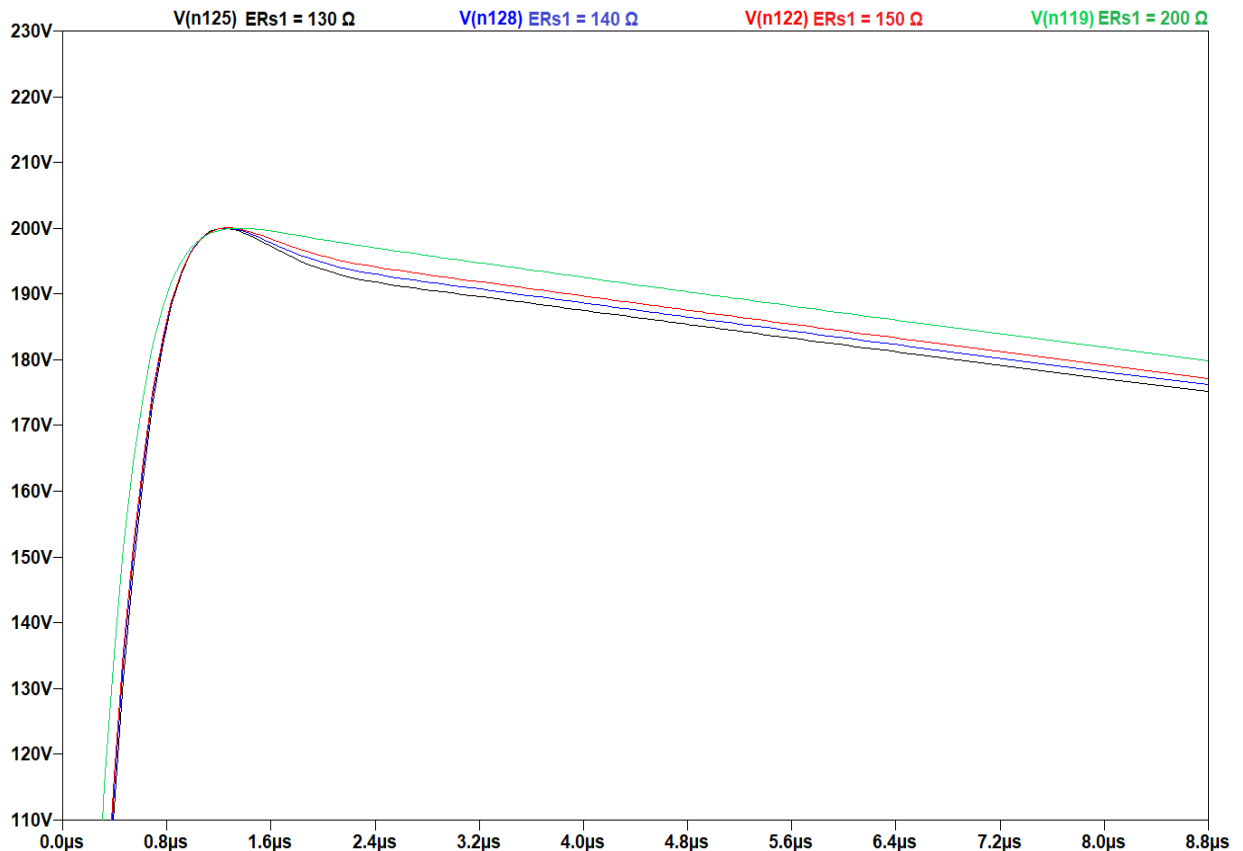
Obr. 4-9 Částečné schéma univerzitního desetistupňového rázového generátoru v programu LTspice

Simulace spočívala v hledání takové velikosti externího rezistoru ERs1, tak aby rozsah kapacity testovaného zařízení byl co největší. Samotná simulace byla založena na hledání dovolených tolerancí pro atmosférický impulz. Postup simulace spočíval v určení si hodnoty externího rezistoru ERs1 a následným hledáním takové kapacity testovaného zařízení, na které bylo přikládáno výstupní napětí s vrcholovou hodnotou 200 kV a které vyhovuje normou stanoveným tolerancím pro atmosférický impulz. Výsledné hodnoty simulace viz Tab. 4-6

Tab. 4-6 Naměřené a vypočítané hodnoty pro simulaci externího rezistoru

ERs1 [Ω]	C ₂ [nF]	U ₁ [kV]	U ₂ [kV]	T [μ s]	T ₁ [μ s]	T ₂ [μ s]	Rozsah C ₂ [nF]
130	0,71	20,49	200	0,504	0,84	47,96	1,50
130	2,21	21,58	200	0,96	1,60	51,81	
140	0,66	20,61	200	0,504	0,84	48,37	1,35
140	2,01	21,54	200	0,935	1,56	51,81	
150	0,61	20,72	200	0,502	0,84	48,70	1,28
150	1,89	21,57	200	0,935	1,56	51,73	
200	0,35	21,04	200	0,504	0,84	49,80	1,05
200	1,4	21,59	200	0,937	1,56	51,90	

Z tabulky můžeme vidět, že pro všechny hodnoty externího rezistoru ERs1 byla nalezena taková velikost kapacity, která vyhovuje mezním hodnotám atmosférického impulsu pro dobu čela impulsu 0,84 μs a 1,56 μs . Z těchto hodnot jsme našli výsledný rozsah kapacity testovaného zařízení. Z naměřených hodnot můžeme vidět, že externí rezistor o hodnotě 130 Ω má největší rozsah. Naopak simulace s externím rezistorem o hodnotě 200 Ω má nejmenší rozsah. Z těchto výsledků by se dalo odvodit, že se zmenšující se hodnotou externího rezistoru nám bude růst rozsah zatěžovací kapacity. Na Obr. 4-10 však můžeme vidět, že se snižující se hodnotou externího rezistoru vzniká překmit.

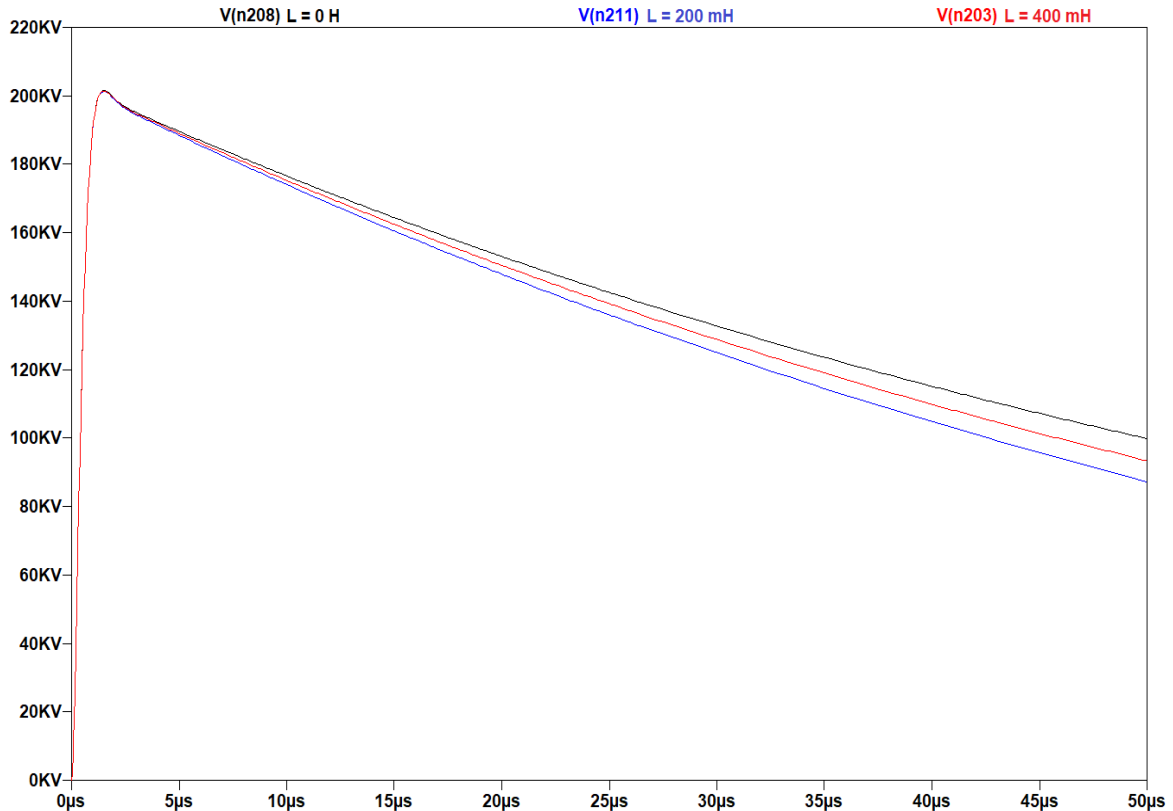


Obr. 4-10 Průběhy výstupních napětí pro různé hodnoty externího rezistoru

Z tohoto důvodu již nebyla provedena simulace s nižší hodnotou externího rezistoru, jelikož by docházelo ve vrcholu impulsu k takovým překmitům, které by již nesplňovaly normou stanovené dovolené tolerance pro atmosférický impuls.

4.5 Simulace s přidáním paralelní indukční složkou

V této simulaci měla být ověřena odezva výstupního napětí na paralelně připojenou indukční složku. Na Obr. 4-11 je možné vidět výsledné průběhy výstupního napětí. První křivka zobrazuje zapojení generátoru pouze s kapacitou $C = 1 \text{ nF}$, následující dvě křivky jsou výsledkem připojení paralelní indukčnosti L . Z průběhů můžeme vidět, že paralelně připojená indukčnost má za následek snížení doby půltýlu T_2 .



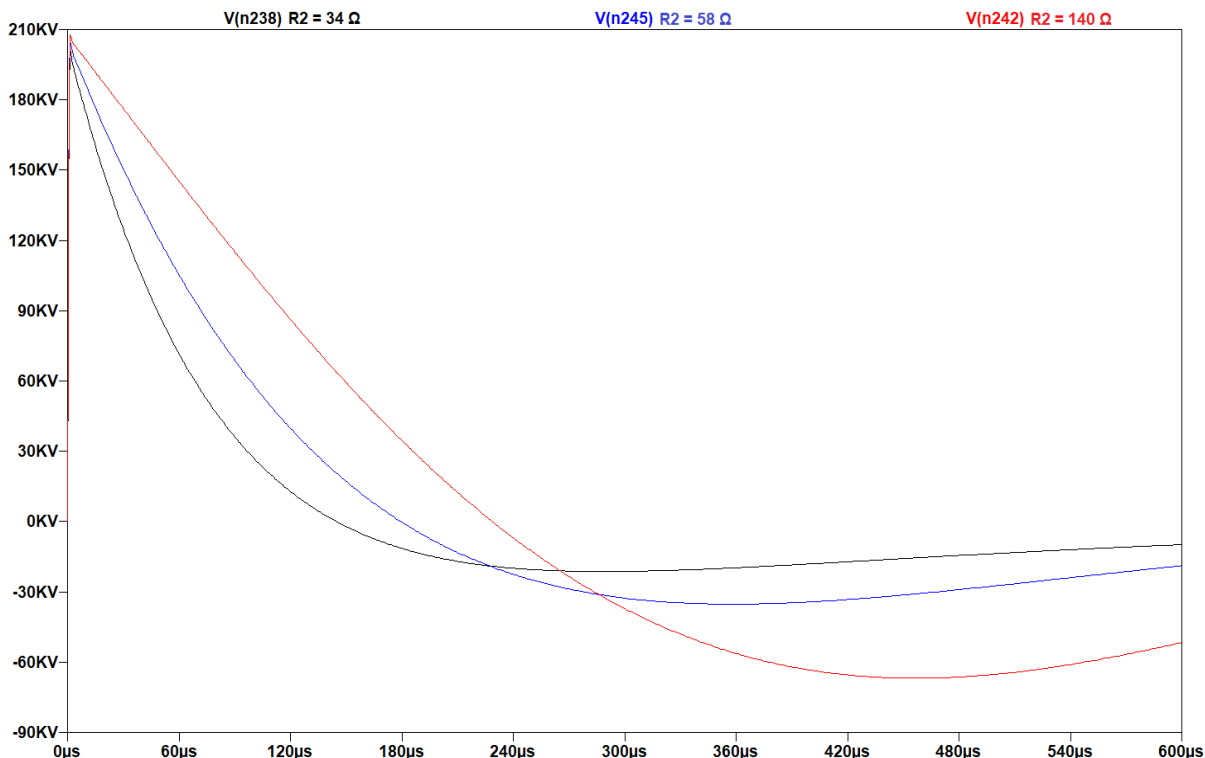
Obr. 4-11 Průběhy výstupního napětí pro různé hodnoty paralelně připojené indukčnosti

Doba půltýlu v případě zátěže s kapacitou $C_2 = 1 \text{ nF}$ byla $49,33 \text{ } \mu\text{s}$, mezitím v případě zátěže $C_2 = 1 \text{ nF}$ s paralelně připojenou indukčností o hodnotě $L = 400 \text{ mH}$ byla $45,33 \text{ } \mu\text{s}$. Všechny výsledné naměřené hodnoty včetně hodnoty L , kdy již doba půltýlu T_2 nebyla v toleranci, můžeme najít v Tab. 4-7. Z naměřených hodnot je zřejmé, že se snižující se hodnotou paralelně připojené indukčnosti L klesá doba půltýlu T_2 .

Tab. 4-7 Změřené doby půltýlu T_2 pro různé hodnoty paralelně připojené indukčnosti

L [mH]	T_2 [μs]
0	49,33
140	39,97
200	42,27
400	45,33

Jedna z možností, jak kompenzovat paralelně připojenou indukčnost, která má za příčinu zmenšení doby půltýlu je zvětšení hodnoty týlního rezistoru. Na Obr. 4-12 můžeme vidět průběh simulace. Z průběhů výstupního napětí je zřejmé, že se zvyšující se hodnotou týlního rezistoru se zvětšuje doba půltýlu T_2 .



Obr. 4-12 Průběhy výstupního napětí pro různé hodnoty tlumičového rezistoru R_2

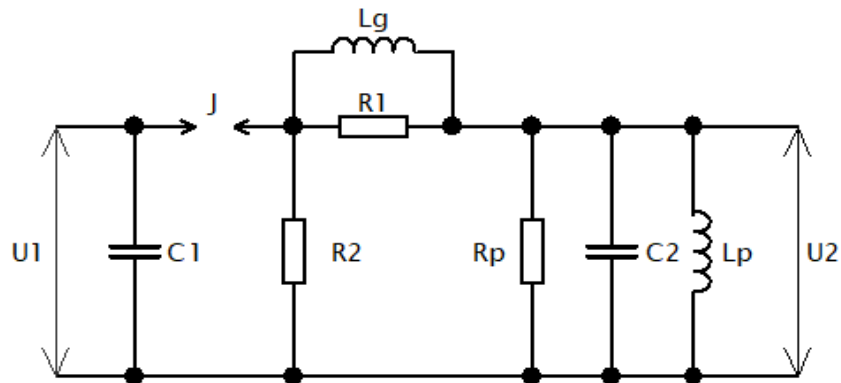
Jedním z efektů způsobeným zvětšeným tlumičovým rezistorem R_2 a paralelně připojenou indukčností k testovanému objektu může být zvětšení podkmitu. Z průběhů výstupního napětí je na první pohled vidět, že v případě zapojení s vyšší hodnotou tlumičového rezistoru dochází k větším podkmitům, než jak je tomu v případě zapojení s menší hodnotou tlumičového rezistoru. Norma IEC 60076-4 říká: „Pokud je tvar vlny oscilující kvůli extrémně nízké indukčnosti nebo malé kapacitě generátoru, neměla by amplituda opačné polaritý překročit 50 % maximální hodnoty první amplitudy.“

Tab. 4-8 Naměřené a vypočítané hodnoty podkmitů pro různé hodnoty tlumičového rezistoru

R_2 [Ω]	U_2 [kV]	T_2 [μ s]	Podkmit [kV]	Podkmit [%]
34	201,45	42,14	-21,32	10,58
58	205,07	62,17	-35,26	17,19
140	208,14	101,14	-66,89	32,14

Z Tab. 4-8 je možné vidět výsledné hodnoty podkmitu pro různé velikosti tlumičového rezistoru. Z vypočtených procentních hodnot podkmitu je možné vidět, že všechna zapojení vyhověla normou stanovené toleranci pro maximální podkmit. V případě, kdy by došlo ke zvětšení hodnoty paralelního rezistoru, by již tato podmínka nebyla splněna. Z naměřených hodnot je možné vidět, že zvětšením hodnoty tlumičového rezistoru dochází k natažení doby půltýlu.

Jedna z dalších možností, jak se vypořádat s paralelně připojenou indukčností k testovanému zařízení je pomocí Glaningerova obvodu Obr. 4-13.



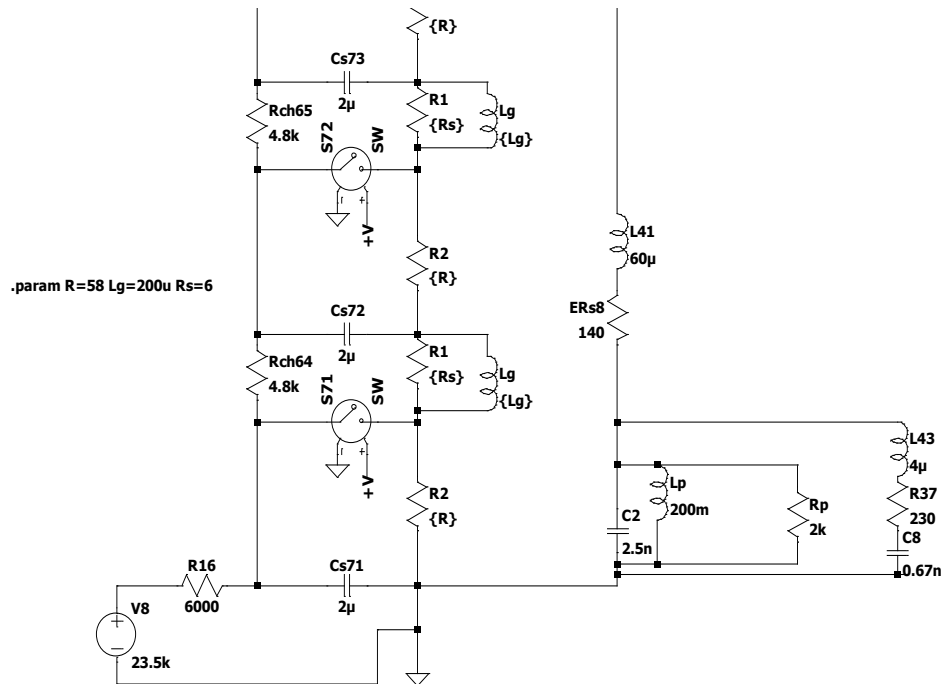
Obr. 4-13 Schéma Glaningerova obvodu

Jedná se o rozšíření rázového generátoru o prvky L_g a R_p . Induktor L_g představuje Glaningerovu cívku, jejíž hodnota se pohybuje mezi $100 \mu\text{H}$ až $200 \mu\text{H}$. Velikost této indukčnosti se musí pohybovat v těchto hodnotách, aby byla zaručena podstatná změna tvaru čela impulzu a zároveň došlo k přemostění čelního odporu R_1 . To znamená, že průběh čela atmosférického impulzu je nezměněn a doba půltýlu impulzu se rozšíří. Paralelně připojený rezistor R_p , s indukčností testovaného objektu L_p tvoří napěťový dělič společně s Glaningerovou cívkou L_g a čelním odporem R_1 (R_p/L_p s L_g/R_1) [5].

Glaningerův obvod je navržen na maximální hodnotu atmosférického impulzu o hodnotě 200 kV . Použití Glaningerova obvodu je spíše pravidlem a není vždy nutné. Přináší nám nejlepší možnou adaptaci atmosférického impulzního napětí vůči testovanému objektu [5].

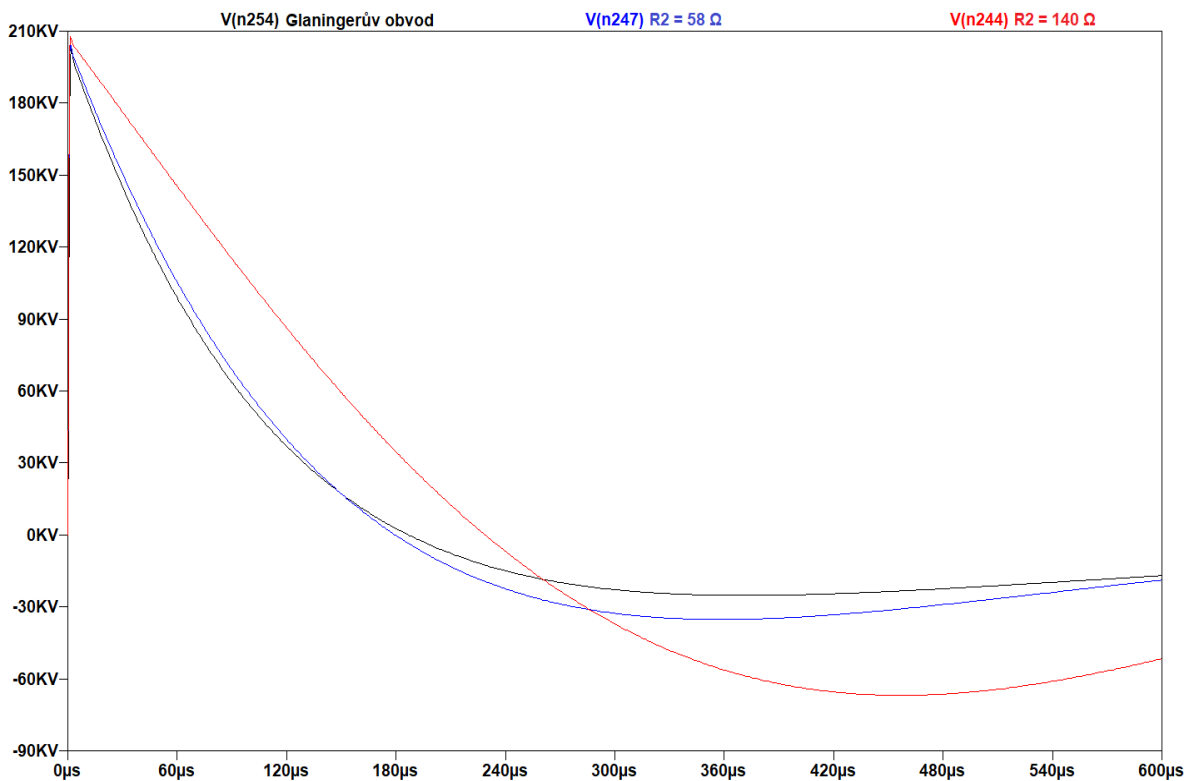
Následující simulace ukáže porovnání a výhody Glaningerova obvodu vůči zapojení se zvětšeným týlním rezistorem R_2 . Obr. 4-14 zobrazuje dva stupně elektrického schématu s Glaningerovým obvodem v programu LTspice. Schéma obsahuje nabíjecí zdroj o velikosti $23,5 \text{ kV}$, činnou kapacitu na jeden stupeň generátoru 2 nF . Hodnota čelního rezistoru byla zvolena 6Ω na jeden stupeň generátoru a hodnota týlního odporu 58Ω . Paralelně připojený rezistor k zátěži jsem zvolil $2 \text{ k}\Omega$. Jako testované zařízení byla použita kapacita $C_2 = 2,5 \text{ nF}$ s paralelně připojenou indukčností $L_p = 200 \text{ mH}$. Hodnota Glaningerovy cívky byla zvolena $L_g = 200 \mu\text{H}$

Tato simulace vznikla za účelem ověření funkčnosti Glaningerova obvodu. Z tohoto důvodu byla výstupní data porovnávána se simulací, kde byly měněny pouze týlní rezistory. V praxi by nebylo nutné použití Glaningerova obvodu, pouze by došlo ke změně hodnoty týlního rezistoru.



Obr. 4-14 Částečné schéma univerzitního desetistupňového rázového generátoru s Glaningerovým obvodem v programu LTspice

Na následujícím Obr. 4-15 můžeme vidět výsledné průběhy výstupního napětí této simulace.

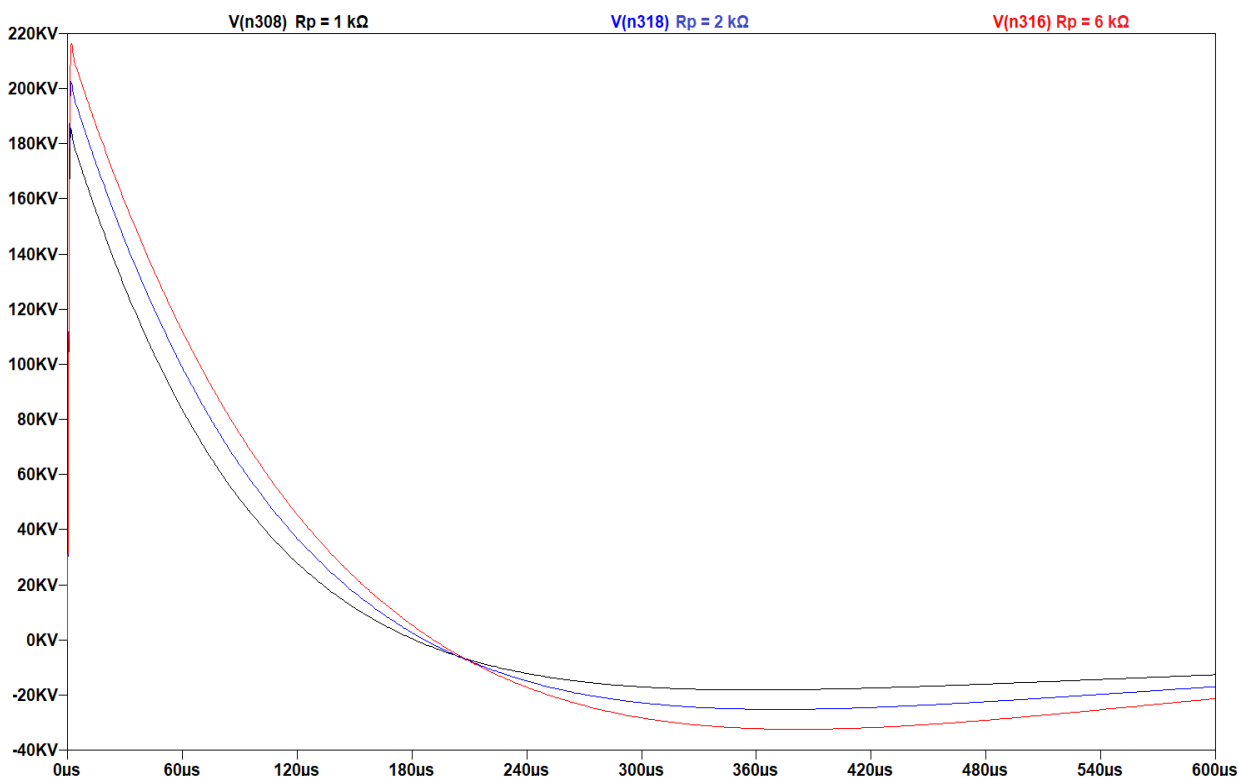


Obr. 4-15 Porovnání průběhů výstupního napětí s Glaningerovým obvodem a bez něj

Tab. 4-9 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot s Glaningerovým obvodem a bez něj

Zapojení	U_2 [kV]	T_2 [μ s]	Podkmit [kV]	Podkmit [%]
S Glaningerovým obvodem	203	57,2	-25,23	12,43
Paralelní odpor 58 Ω	205,07	62,17	-35,26	17,19
Paralelní odpor 140 Ω	208,14	101,14	-66,89	32,14

Z naměřených a vypočtených hodnot z Tab. 4-9 je možné vidět, že v případě zapojení s Glaningerovým obvodem již doba půltýlu T_2 vyhovuje dovoleným a normou stanoveným tolerancím pro atmosférický impulz. S Glaningerovým obvodem také dochází k menšímu podkmitu. Velikost podkmitu je závislá na velikosti týlního rezistoru, který má ovšem i velký vliv na dobu půltýlu T_2 . Na velikosti podkmitu má také podíl velikost rezistoru R_p připojeného paralelně k zátěži. Závislost velikosti podkmitu na rezistoru R_p je možné vidět na Obr. 4-16.

Obr. 4-16 Závislost velikosti podkmitu na hodnotě odporu R_p

Z průběhů výstupního napětí je možné vidět, že se změnou rezistoru R_p dochází k výrazné změně celého průběhu impulzu. U nižší hodnoty R_p nedosahuje vrcholová hodnota napětí takových hodnot jako u vyšší. Podkmit je naopak u nižší hodnoty rezistoru R_p menší nežli u vyšší hodnoty. Naměřené hodnoty z této simulace je možné vidět v Tab. 4-10.

Tab. 4-10 Změřené a vypočtené hodnoty při změně rezistoru R_p

R_p [k Ω]	U_2 [kV]	podkmit [kV]	podkmit [%]
1	185,60	-18,17	9,79
2	203,10	-25,23	12,42
6	216,55	-32,46	14,99

Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval problematikou rázových generátorů napětí. V první kapitole byla podrobně vysvětlena funkce rázového generátoru a jeho různá zapojení. Následně bylo popsáno, co a jakými druhy impulzů se za pomoci rázového generátoru testuje. V další kapitole jsou popsány zkoušky, zkušební postupy, v jakých podmínkách je testováno a za jakých podmínek je zkouška úspěšná, či naopak.

Následně byl pomocí programu LTspice sestaven model rázového generátoru, díky němuž bylo možné realizovat veškeré simulace. Pomocí simulací jsme si ověřili teoretické poznatky.

V první podkapitole praktické části byly ověřeny a porovnány simulace s matematickými výpočty. K ověření správnosti simulovaných průběhů bylo zapotřebí vypočítat průběh výstupního napětí jednostupňového rázového generátoru. Stejný generátor byl následně vymodelován v programu LTspice. Výsledky simulace byly porovnány s výsledky matematického výpočtu. Při porovnání obou výsledků bylo zjištěno, že se matematické výpočty lehce liší od simulace. Tento rozdíl byl způsoben dvěma faktory. Prvním faktorem byl příkaz pro funkci jednostupňového rázového generátoru v programu LTspice, který byl nutný pro správnou funkčnost a eliminaci použití dalšího prvku do obvodu. Tento příkaz již nebyl nutný při dalších simulacích s vícestupňovým rázovým generátorem, a neměl tedy v těchto simulacích vliv na výsledné hodnoty. Druhým faktorem mohlo být špatné odčítání hodnot z Obr. 4-4, které jsou nezbytné pro výpočet doby čela a doby půltýlu. Z těchto výsledků bylo usouzeno, že simulované průběhy pro zapojení vícestupňových rázových generátorů budou správné a mnohem jednodušší nežli matematické výpočty.

V prvních simulacích s vícestupňovým rázovým generátorem byly ověřeny základní funkce rázového generátoru v programu LTspice. Správné navržení celého generátoru bylo nezbytnou součástí celé práce, bez níž by simulace nebyly možné. Tyto simulace byly zaměřeny na chování výstupního napětí vůči různým druhům zátěže. Jejich výsledky potvrdily správnost zapojení rázového generátoru v programu LTspice a také posloužily k ověření teoretických poznatků. V simulacích byla s čistě kapacitní zátěží ověřena správnost tvaru výstupního napětí, následně byly nalezeny mezní hodnoty kapacity pro určité zapojení generátoru. V případě zapojení se sériovou indukčností bylo ověřeno chování výstupního napětí na vzniklý nepříznivý překmit. Následně byl popsán výpočet a praktická filtrace tohoto překmitu.

Pro další simulace byl vymodelován v programu LTspice Rázový generátor, který se používá ve zkušebně vysokého napětí na VUT v Brně. Bylo tomu tak učiněno v návaznosti na další simulaci, která se týkala externího rezistoru. Tato simulace se osvědčila jako velice přínosná z důvodu obtížné manipulace s externím rezistorem, který se nachází na vrcholu generátoru. Při této simulaci měla být nalezena nejideálnější hodnota externího rezistoru pro daný rázový generátor. Pro nalezení této hodnoty byl použit nově vymyšlený postup měření. Z vypočtených a naměřených hodnot bylo zjištěno, že pro zvolený rázový generátor je nejvhodnější hodnota externího rezistoru 130Ω .

Simulace s paralelně připojenou indukčností měla ověřit chování výstupního napětí na danou změnu v zapojení. Následně byly provedeny změny v zapojení pro odstranění tohoto nepříznivého chování výstupního napětí. Při simulacích bylo zjištěno, že paralelně připojená indukčnost má negativní vliv na půltýl impulzu. Pro zmírnění tohoto jevu byly následně použity a porovnány dva postupy. Prvním z postupů bylo zvětšení hodnoty týlního rezistoru, který se ukázal jako efektivní řešení. Velkou nevýhodou tohoto řešení byl vznik podkmitu a malá

variabilita. Z tohoto důvodu byl použit Glaningerův obvod jako druhý postup. Glaningerův obvod se ukázal jako funkční metoda pro paralelně připojenou indukčnost. Ze simulací bylo potvrzeno, že při použití Glaningerova obvodu dochází k menším podkmitům a doba půltýlu také vyhovovala normou stanoveným tolerancím pro atmosférický impulz. Nevýhodou Glaningerova obvodu byla jeho komplikovanost.

Všechny tyto simulace by měly mít přínos při navrhování některých zkoušek či navrhování samotného rázového generátoru a jeho součástí. Program LTspice přináší z tohoto ohledu mnohá usnadnění a možnost provedení zkoušek či modifikací. Velkou nevýhodou programu je jeho nepříznivé uživatelské prostředí. Při odečítání některých hodnot není možná stoprocentní přesnost měření, z tohoto důvodů mohou být konečné výsledky lehce ovlivněny.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] VEVERKA, Antonín, 1982. *Technika vysokých napětí*. Praha 1: SNTL, 283–295 s.
- [2] BLAŽEK, Vladimír, 2013. *Zkušební zdroje vysokého napětí*. VUT Brno.
- [3] TOMAN, Petr, 2011. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [4] ČSN EN 60060-1, *Technika zkoušek vysokým napětím: Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*, 2011.
- [5] SAHU, Lukesh Kumar, 2013. *Impulse Voltage Test of Power Transformers* [online]. Indie [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://www.ijer.net/conf/NCKITE2015/58.pdf>. Department of Electrical and Electronics Engineering, KITE Raipur Chhattisgarh Swami Vivekananda Technical University Raipur (C. G.) India.
- [6] PÁNEK, David, 2011. *LTspice* [online]. [cit. 2019-12-06]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~lsroubov/TE1/LTspice_navod.pdf
- [7] WOLF, J. *Impulse Voltage Generator Type SG: Operating Instructions*. 2004.