

**UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2009

Bc. Václav GROSSMANN

**Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera**

**Šíření rázové vlny atmosférického původu v trakčním vedení
stejnoseměrné soustavy 3 kV**

Bc. Václav Grossmann

**Diplomová práce
2009**

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 20. 4. 2009

Bc. Václav Grossmann

Poděkování:

Chtěl bych touto formou poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Karlu Hlavovi CSc. za obětavou pomoc a velkou trpělivost při psaní této práce. Jeho cenné rady a životní zkušenosti mi byly velkou inspirací při psaní této závěrečné práce.

Souhrn

Tato práce je zaměřena na šíření rázové vlny atmosférického původu v trakčním vedení stejnosměrné soustavy 3 kV. Jsou zde zmíněny parametry trakčního vedení a jejich zapojení v náhradním schématu. Dále se v této práci hovoří o rázové vlně. Rázová vlna je tu popsána podle norem IEC a také je zmíněn případ rázové vlny použité pro zkoušky u ČSD. Následně jsou zde zmíněna místa na trakčním vedení, kde dochází k odrazům rázové vlny. V poslední části se tato práce zmiňuje o kovovém stožáru trakčního vedení a jeho výstroji při úderu blesku do stožáru. Jsou zde popsány jeho parametry, náhradní schéma a jaké napětí se může objevit na jeho výstroji a na ukolejnění stožáru.

Summary

This thesis focuses on atmospheric origin shock wave propagation in 3 kV DC system traction mains. It mentions parameters of the traction mains and their connection in the equivalent diagram. The thesis then elaborates on the shock wave, which is described in line with the IEC standards, as well as mentions the case of the shock wave being used for tests performed at ČSD (Czech Railways). Consequently, the thesis also mentions places in the traction mains where shock wave is reflected. In the concluding part the thesis talks about metal traction mains mast and its equipment for an event of lightning stroke. Its parameters and equivalent diagrams are described, along with the level of voltage that may occur on its equipment and the mounting fixture of the mast.

Obsah

Úvod	10
1 Charakteristika trakčního vedení stejnosměrné soustavy z hlediska šíření rázové vlny .	11
1.1 Měrné parametry TV stejnosměrné soustavy	11
1.2 Rázové charakteristiky TV stejnosměrné soustavy	13
1.2.1 Homogenní TV	14
1.2.2 Nehomogenní TV a jeho vliv	20
1.3 Rázová charakteristika trakční měřírny	21
1.3.1 Trakční napájecí stanice na 3 kV DC vůči napájecí síti	22
1.3.2 Trakční napájecí stanice na 3 kV DC vůči trakčnímu vedení	28
1.3.3 Vliv vzduchového reaktoru na trakční měřírnu	30
2 Modelování rázové vlny atmosférického původu	32
2.1 Tvar rázové vlny podle IEC	32
2.2 Podrobnější tvar rázové vlny	33
2.3 Modelování úderu bleskového výboje jako zdroje rázové vlny	33
3 Zákonitosti odrazů rázové vlny	36
3.1 Charakteristika bodů TV z hlediska odrazů rázové vlny	36
3.1.1 Místo zkratu na vedení	38
3.1.2 Otevřený konec vedení	39
3.1.3 Styk vedení s různými vlnovými impedancemi	39
3.1.4 Vliv napájecí a spínací stanice	40
3.1.5 Vliv hnacího vozidla	40
3.2 Bewley-ho mřížka	41
3.3 Příklad experimentálně zjištěných míst vzniku odrazů rázové vlny	45
4 Poměry po úderu blesku do stožáru TV	48
4.1 Elektrické parametry kovového stožáru TV a jeho výstroje	48
4.2 Náhradní obvod pro ukolejnění stožáru	49
4.2.1 Obvod bez vřazené indukčnosti L_0	50
4.2.2 Obvod s vřazenou tlumivkou do série s kolejovou průrazkou	52
4.3 Napětí na výstroji stožáru a na jeho ukolejnění	53
4.3.1 Napětí na výstroji stožáru a na jeho ukolejnění v obvodu bez vřazené indukčnosti L_0	54
4.3.2 Napětí na výstroji stožáru a na jeho ukolejnění v obvodu s vřazenou tlumivkou do série s kolejovou průrazkou	58
Závěr	61
Seznam použité literatury	62
Seznam obrázků	63
Seznam tabulek	64
Příloha 1: Modelování rázové vlny pomocí nezávislého zdroje napětí typu EXP	65
Příloha 2: Modelování rázové vlny pomocí nezávislého zdroje napětí typu PWL	67
Příloha 3: Modelování rázové vlny pomocí nezávislého zdroje napětí typu PULSE	68
Příloha 4: Modelování rázové vlny na vedení, které je na konci zkratované	69
Příloha 5: Modelování rázové vlny na vedení, které je na konci rozpojené	71
Příloha 6: Modelování rázové vlny na rozpojeném vedení s vřazenou tlumivkou 4mH, která představuje indukčnost měřírny	73
Příloha 7: Náhradní schéma pro ukolejnění stožáru bez vřazené tlumivky L_0 a simulace pomocí SW PSpice	75
Příloha 8: Náhradní schéma pro ukolejnění stožáru s vřazenou tlumivkou L_0 a simulace pomocí SW PSpice	77

Úvod

Počátky elektrické trakce a s tím související trakční vedení lze spojit se jménem Wernera von Siemense, který roku 1879 poprvé předvedl svoji provozuschopnou elektrickou lokomotivu na průmyslové výstavě v Berlíně. Jednalo se v té době spíše o atrakci, i když lokomotiva byla posléze určena pro uhelné doly. Proud do lokomotivy byl přiváděn pomocí třetí kolejnice s profilem ve tvaru „T“.

V českých zemích se stal průkopníkem elektrizace železnic František Křížík, který v rámci II. jubilejní výstavy v Praze předvedl na Letné roku 1891 první tramvajovou trať. První opravdovou elektrizovanou železniční trať u nás byl úsek mezi Táborem a Bechyní, kde byl dne 1. června 1903 zahájen zkušební provoz. Tato dráha byla historicky první elektrizovanou trať pro stejnosměrné napětí o velikosti 1400 V. Z důvodů obav o bezpečnost, které mělo rakouské ministerstvo železnic, bylo navrženo Křížíkovými závody řešení, že trakční proudová soustava bude 2 x 700 V s ukolejněným středním pólem. Výhodou tohoto zapojení bylo, že kolejnicemi netekl žádný trakční proud.

V návaznosti na zkušenosti s předválečnou elektrizací se počátkem padesátých let minulého století začala elektrizace dále rozšiřovat. Avšak narážela na určitá úskalí s velikostí napájecího napětí. Podnětem ke zvýšení velikosti trakčního napětí na 3000 V bylo odstranit problémy s vedením těžkých nákladních vlaků. Největší problémy byly na Slovensku v úseku trati Žilina – Spišská Nová Ves. Tento úsek vedl k většímu rozšíření trakčního stejnosměrného napájecího systému 3 kV.

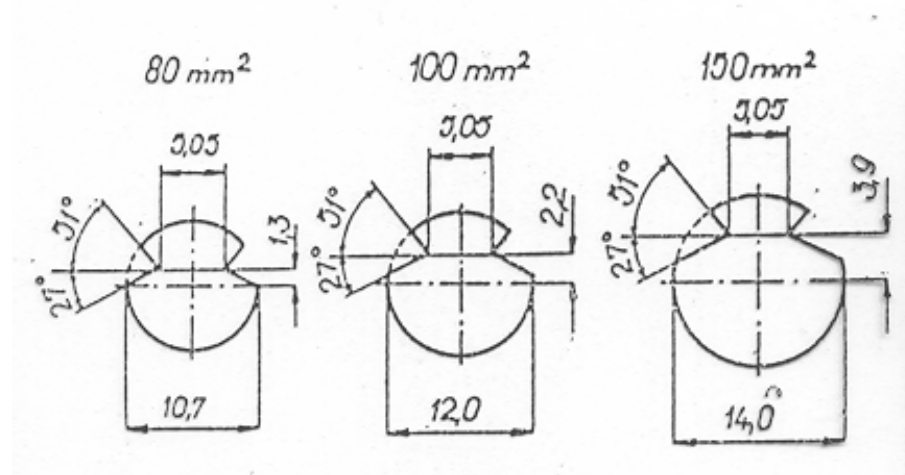
1 Charakteristika trakčního vedení stejnosměrné soustavy z hlediska šíření rázové vlny

1.1 Měrné parametry TV stejnosměrné soustavy

Na úvod je nutno definovat, z čeho se trakční vedení (dále také někdy označené jako TV) skládá a kudy může procházet trakční proud, aby uzavřel svůj elektrický obvod.

Trolejové vedení se nejčastěji skládá z trolejového drátu a nosného lana. Dále trakční proud může být přenášen pomocí zesilovacího vedení, které se využívá v případech zvýšeného odběru na určitém traťovém úseku. Trakční proud se pak uzavírá pomocí zpětného vedení, které je tvořeno pomocí kolejnic a paralelně řazené země, kterou prochází větší část proudu zpět do měřírny.

Trolejový drát je na našem území tvořen čistou mědí. Tvar drátu je dán postupným protahováním za studena. Při této výrobní technologii má trolejový drát vysokou mechanickou pevnost v tahu, která je hlavně požadována. Tuto pevnost může při provozu ohrozit to, že by docházelo k zahřátí drátu v určitém bodě na teplotu převyšující 100 °C. Nejedná se o oteplení. Přípustné oteplení trolejového drátu je mnohem menší než kritická teplota. Je totiž nutno od kritické teploty 100 °C ještě odečíst teplotu okolí.



Obr. 1: Trolejový drát [2]

Sestava trolejového vedení pro zadanou soustavu 3 kV tedy obsahuje trolejový drát o průřezu 150 mm^2 a nosné lano, které je také měděné, o průřezu 100 mm^2 . Nosné lano a trolejový drát jsou spojeny pomocí vodivých spojek, které jsou opět měděné. Tyto spojky se také někdy nazývají jako laníčka a jsou umístovány po 2 až 3 m. Jeden kotevní úsek má pak obvykle délku kolem cca 1500 m, která je dána délkou vodiče, jenž se vejde na jeden transportní buben.

Základním parametrem, kterým se budeme podrobněji zabývat v další části této práce, je ohmický odpor. Tento odpor souvisí s rezonančními frekvencemi vedení, při kterých ho lze teoreticky zanedbat, ovšem v našem případě se bude muset zahrnout v dalších výpočtech. Tato veličina totiž není v čase konstantní, ale je závislá na opotřebení trolejového drátu. Tím pádem se bude měnit hodnota ohmického odporu.

$$R = \rho * \frac{l}{S}, \quad (1.1.1)$$

kde ρ je měrný odpor,

l je délka vedení a

S je vodivý průřez.

Po dosazení do vztahu (1.1.1), kdy za ρ pro měď budeme dosazovat dle fyzikálních tabulek hodnotu $18 \Omega \text{ mm}^2/\text{km}$, dostaneme ohmický odpor pro trolejový drát o velikosti

$$R_{trolej\ drat} = \rho * \frac{l}{S} = 18 * \frac{1}{0,9 * 150} = 0,133 \overline{3} \Omega/\text{km}, \quad (1.1.2)$$

kde hodnota ve jmenovateli 0,9 představuje předpokládané opotřebení na 90 % jmenovitého vodivého průřezu trolejového drátu.

Ohmický odpor pro nosné lano má pak velikost

$$R_{nosné\ lano} = \rho * \frac{l}{S} = 18 * \frac{1}{100} = 0,18 \Omega/\text{km}. \quad (1.1.3)$$

Jelikož se jedná o paralelní kombinaci těchto dvou odporů, a nepředpokládáme existenci zesilovacího vedení, dostaneme hodnotu:

$$R_{TV} = \frac{1}{\frac{1}{R_{trolej\ drat}} + \frac{1}{R_{nosné\ lano}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,133} + \frac{1}{0,18}} = 0,0765 \Omega/km. \quad (1.1.4)$$

Zanedbáváme však vliv odporu laníček, která spojují vodivě nosné lano a trolejový drát. Také se nepředpokládá výskyt příčného propojení u vícekolejné trati.

V tomto vedení se pak mohou šířit rázové vlny. Tato rázová vlna nám ohrožuje elektrická trakční zařízení přepětím. Rázové vlny mohou vznikat dvojím způsobem. První je rázová vlna přepětí způsobeného spínacími pochody v trakčním obvodu. Druhý způsob, jak může vzniknout rázová vlna a s tím související přepětí, je atmosférický vliv. Tímto druhým způsobem se budeme v této práci dále podrobněji zabývat. Přepětí atmosférického původu můžeme poté dále dělit dle příčiny vzniku. Vznik rázové vlny může být tedy zapříčiněn přímým úderem blesku do některých z částí trakčního obvodu, nebo úderem blesku v blízkosti trakčního obvodu a následným naindukováním napětí.

Jelikož je trakční vedení nejrozsáhlejší částí trakčního obvodu, budeme nejprve zkoumat jak se chová a jaké má vlastnosti TV.

1.2 Rázové charakteristiky TV stejnosměrné soustavy

Většina jevů, k nimž dochází na různých částech trakčního obvodu, má rázový charakter. Rázové charakteristiky nám popisují odezvy a reakce částí trakčního obvodu na tyto jevy. Ve všech případech se musí vycházet z elektrického schématu jednotlivých prvků, nebo alespoň z náhradního schématu. Náhradní schéma je schéma, které využívá určitých zjednodušení při tvorbě a jsou zde také pomíjeny některé vlastnosti prvků. Tato zjednodušení poskytují dostatečně přesné výsledky. Zjednodušení se dosahuje tím, že pomineme části náhradního schématu, která se projevují pouze při vyšších frekvencích. Toto zjednodušení je přijatelné, pokud se předpokládá výskyt trakčních proudů i včetně harmonických složek do určitého řádu. Podle dosavadních zkušeností jsou tato zjednodušení dostatečná přibližně ještě pro výpočty uvažující 11. harmonickou vlnu. Ve frekvenčním vyjádření je to kmitočet o velikosti 550 Hz. Obsah vyšších proudových harmonických složek se pohybuje v řádu jednotek procent základní harmonické. Rázové jevy jsou však neperiodického spojitého průběhu, jejichž spektrum je spojitě a nekonečné. Při rázovém jevu se

v trakčním obvodu projevují i frekvenční složky, které se za normálních okolností při běžném provozním stavu nevyskytují. Z tohoto důvodu je nutno omezit zjednodušování obvodů. Náhradní schémata by pak měla obsahovat všechny náhradní prvky.

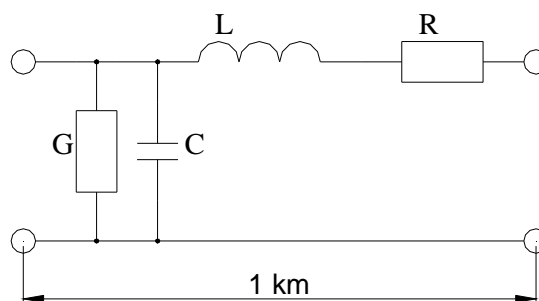
Problémy, při tvorbě náhradních schémat, jsou také způsobeny rozdíly ve výrobních vlastnostech jednotlivých prvků a nebo geografickými faktory. Tyto rozdíly nelze nikdy plně zakomponovat do modelů. Geografické faktory se nejvíce týkají umístění trakční napájecí stanice (v našem případě měnírny) a zpětného trakčního vedení, které je tvořeno částečně zemí. Tyto vlivy není možno spolehlivě a zcela ošetřit pomocí schématu, jelikož se jedná o faktory neznámé nebo proměnné.

1.2.1 Homogenní TV

Trakční vedení je možno považovat za jeden závit složený z trolejového vedení a zpětného vedení. Trolejové vedení lze poté po elektrické stránce přiblížit jako dlouhé homogenní vedení s rozprostřenými parametry. Pod pojmem rozprostřený parametr je myšlena hodnota vztahovaná na 1 km délky TV. Úvaha o dlouhém vedení je mnohem výhodnější, než simulovat vedení pomocí dvoubranů. Mezi parametry TV lze zařadit čtyři základní veličiny:

- *Indukčnost* vzdušné smyčky, která je tvořena TV složeného z trolejového vedení a zpětného vedení obsahujícího kolejnice a zem.
- *Kapacitu* TV, která je dána mezi TV a zemí.
- *Ohmický odpor* smyčky, který je tvořen TV složeného z trolejového vedení a zpětného vedení obsahujícího kolejnice a zem. Tento odpor je dán vodivým průřezem vodičů trolejového vedení. Je zde zapotřebí vzít v úvahu i jisté opotřebení trolejového drátu, které snižuje jeho vodivý průřez a tím pádem zvyšuje jeho měrný odpor. Pro výpočty se proto předpokládá s opotřebením na 90 % jmenovitého vodivého průřezu trolejového drátu.
- *Svodový odpor* trolejového vedení proti zemi. Tento parametr lze ve výpočtech pro zjednodušení zanedbat. Tato možnost je dána díky dnes používaným dřívkovým izolátorům, které mají dlouhé povrchové cesty. Tyto izolátory se oproti dříve používaným izolátorům tolik neznečišťují na povrchu.

To je také velkou měrou způsobeno ukončením pravidelného parního provozu. Z toho plyne, že jejich svodový odpor dosahuje vysokých hodnot a umožní tak zjednodušení výpočtů.



Obr. 2: Náhradní zapojení homogenního vedení

Hlavními parametry, kterými se budeme zabývat, jsou veličiny měrná indukčnost a měrná kapacita trolejového vedení. Za předpokladu, že trolejové vedení budeme považovat za homogenní (trolejové vedení, které má v libovolném místě vždy stejné měrné parametry). Při splnění předpokladu lze stanovit veličinu, kterou je **vlnová impedance dlouhého vedení**, která je dána vztahem:

$$Z_v = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1.2.1)$$

kde $R + j\omega L$ představuje podélnou impedanci trolejového vedení

a $G + j\omega C$ představuje příčnou admitanci trolejového vedení.

Pokud zanedbáme ohmickou složku podélné impedance (ohmický odpor trolejového vedení R , který má vliv především na velikost útlumu přepětových jevů) a svod vedení G dostaneme po vykrácení $j\omega$ zjednodušený výraz pro vlnovou impedanci ve tvaru:

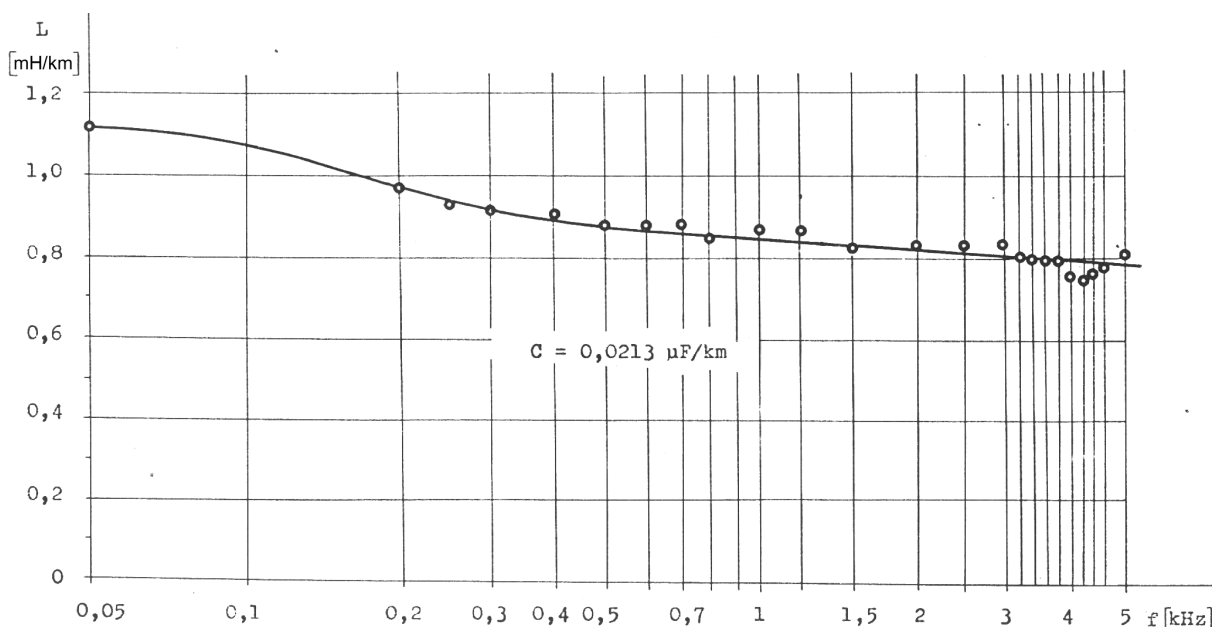
$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.2.2)$$

kde L [H/km] je měrná indukčnost trolejového vedení

a C [F/km] je měrná kapacita trolejového vedení.

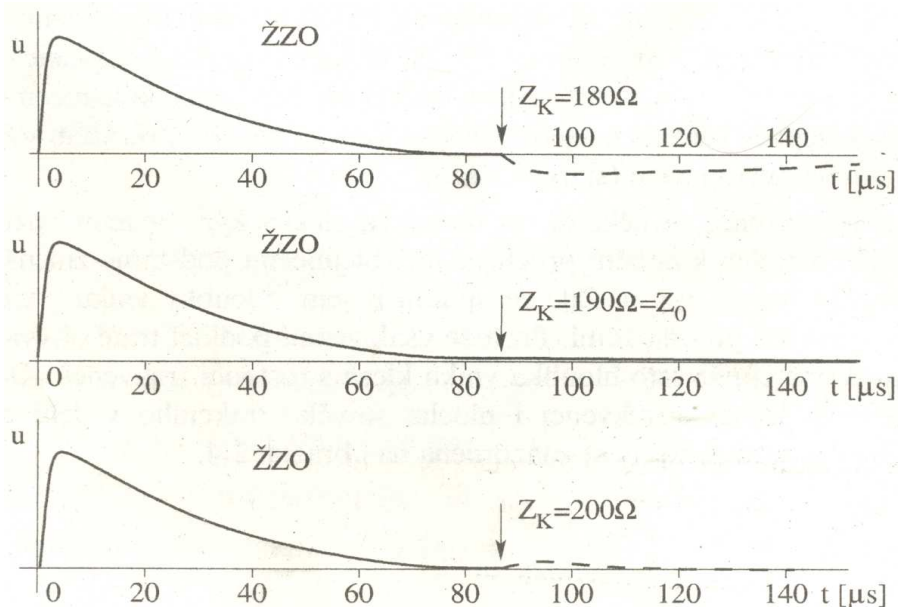
Velikost vlnové impedance pro ukončení přizpůsobeného trakčního vedení dle vztahu (1.2.2) je stanovena pro podmínky Železničního zkušební okruhu na cca

190 Ω . Tento rezistor byl konstruován jako bezindukční a byl vložen mezi trolejové vedení a kolejnici. K této hodnotě se došlo experimentálně na zkušebním okruhu VÚŽ, na kterém byly zjištěny při měření následující parametry. Délka trakčního vedení byla 13,2 km. Trakční vedení se pak skládalo z měděného trolejového drátu o velikosti 150 mm², nosného lana z AlFe o velikosti 210 mm² a ze zesilovacího lana o velikosti 150 mm², které bylo opět z materiálu AlFe. Měrná kapacita pro toto uspořádání při kmitočtu 50 Hz pak činila $C = 21,3$ nF/km a měrná indukčnost pro stejný kmitočet byla stanovena na $L = 1,14$ mH/km. Pro frekvenci 5 kHz se pak měrná indukčnost snížila na $L = 0,8$ mH/km. Průběh měrné indukčnosti v závislosti na frekvenci je pak znázorněn na následujícím obrázku.



Obr. 3: Frekvenční závislost měrné indukčnosti trakčního obvodu [1]

Při těchto parametrech se zkušelo, jak se bude chovat zakončené vedení, když se použije rezistor o hodnotě 180 Ω , 190 Ω a 200 Ω . Při hodnotě 180 Ω se kusá rázová vlna 1/20 μ s z rázového generátoru odrazila s opačnou polaritou. Při použití zakončovacího rezistoru o hodnotě 200 Ω se rázová vlna odrazila se stejnou polaritou. Z toho vyplývá, že zakončovací odpor, kdy bylo trakční vedení přizpůsobeno, je $Z_0 = 190$ Ω . Výsledné charakteristiky dle [1] jsou pak zobrazeny na následujícím obrázku.



Obr. 4: Šíření rázové vlny v trakčním obvodu [1]

Jak již bylo zmíněno, měrná kapacita trakčního vedení je tvořena kapacitou všech vodičů, ve kterých je vedeno trakční napětí, a je měřena proti zpětnému vedení, které je tvořeno kolejnicemi a zemí. Číselná hodnota bude především záviset na počtu vodičů a na jejich průměru. Také však velmi bude záležet na konfiguraci okolí železničního svršku elektrizované tratě. Rozdíl bude v tom, zda trať povede po náspu, tunelem, nebo bude v zářezu. Proto lze za průměrnou hodnotu pro DC soustavu považovat $C = 20 \text{ nF/km}$. Tato hodnota je jen pro širou trať. Pokud by se počítala měrná kapacita trolejového vedení pro větší železniční stanice, bylo by nutno ještě zohlednit kapacitu rozvinuté délky elektrizovaných staničních kolejí. Celkovou kapacitu by pak tvořil součet měrných kapacit pro širou trať a železniční stanici.

K samotnému výpočtu měrné kapacity jednoduchého vedení lze využít dle zdroje [5] vzorec:

$$C = \frac{\pi * \epsilon_0 * \epsilon_r * l}{\ln \frac{2 * h}{d}}, \quad (1.2.3)$$

kde l představuje délku vodičů, h je vzdálenost válcové elektrody od desky a d je průměr válcové elektrody. Tento vzorec lze využít pouze za předpokladu, že se jedná o dvě nesouosé rovnoběžné válcové elektrody, nebo pokud uvažujeme náhradu jedné válcové elektrody za vodivou desku.

Z hlediska frekvenční závislosti měrné kapacity trakčního vedení bylo experimentálně zjištěno, že tato číselná hodnota není na kmitočtu závislá. Referenční povrch země totiž tvoří ekvipotenciální plochu. [1]

Naopak u frekvenční závislosti, která se týká měrné indukčnosti smyčky trakčního vedení, jak již bylo výše zmíněno, je situace složitější. Lze sice zanedbat vnitřní indukčnost jednotlivých vodičů trakčního vedení nesoucích trakční napětí, ale nelze zanedbat podstatný vliv vnitřní indukčnosti zpětného vedení. Nejpodstatněji se tento vliv projevuje u kolejnice, která představuje masivní ocelový vodič s velkým průřezem. Tato kolejnice pak vykazuje při vzrůstající frekvenci vyšší odpor, který je způsoben povrchovým jevem. Tento jev se také nazývá skin-efekt. Nutné je též respektovat vliv hloubky vniku zpětného proudu do země a její vliv na rozměry smyčky – s frekvencí klesá hloubka vniku a tedy s frekvencí klesá i měrná indukčnost smyčky. Za průměrnou hodnotu pro DC soustavu, lze pak stanovit dle zdroje [10] měrnou indukčnost L o velikosti 1,2 mH/km.

Dalším důležitým parametrem, kromě vlnové impedance, je **činitel šíření vlny**. Tento parametr je pak dán vztahem:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (1.2.4)$$

kde při stejném zjednodušení jako u vlnové impedance dostaneme vztah:

$$\gamma = \omega\sqrt{LC} \quad (1.2.5)$$

Činitel šíření vlny lze rozložit na část reálnou a část imaginární. Reálná část nám poté představuje **konstantu tlumení β** . Imaginární část nám poté udává **α** což je **fázová konstanta** (konstanta šíření). Obě konstanty lze odvodit ze vzorce (1.2.2) pro " γ ", kdy při dodržení podmínek

$$\omega L \gg R \text{ a } \omega C \gg G$$

plyne vhodnější vyjádření vztahu, které jest:

$$\gamma = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2}\sqrt{\frac{L}{C}} + j\omega\sqrt{LC} \quad (1.2.6)$$

Z této rovnice lze poté získat konstantu tlumení β

$$\beta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.2.7)$$

a fázovou konstantu α ve tvaru

$$\alpha = \omega \sqrt{L.C} \quad (1.2.8)$$

Podobně můžeme ještě upravit i výše zmíněný vzorec (1.2.1) pro vlnovou impedanci dlouhých vedení. Je však nutno dodržet již zmíněné předpoklady.

$$Z_v = \sqrt{\frac{L}{C}} \left[1 - j \left(\frac{R}{2\omega L} - \frac{G}{2\omega C} \right) \right] \quad (1.2.9)$$

Tyto odvozené složky mají zásadní vliv na šíření vln po trolejovém vedení a jak již bylo dříve zmíněno, jedná se o parametry vztahované na jednotkovou délku vedení (na 1 km). Konstanta tlumení β nám tedy vyjadřuje jaký bude útlum na jednotkové délce vedení a fázová konstanta α nám udává fázovou změnu na jednotkovou délku vedení.

Délku vedení s fázovým rozdílem napětí 2π potom nazýváme **vlnovou délkou** označovanou jako λ . Tato vlnová délka je pak dána výrazem

$$\lambda = \frac{2\pi}{\alpha} \quad (1.2.10)$$

Po dosazení za fázovou konstantu α dostaneme výraz

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{L.C}} \quad (1.2.11)$$

Kmitočet harmonického napětí pro danou vlnovou délku je pak dán vztahem

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1.2.12)$$

Rychlost šíření určité fáze napěťové vlny se nazývá **fázová rychlost**. Tato fázová rychlost se značí v a je dána vztahem

$$v = f \cdot \lambda = \frac{2\pi f}{\alpha} = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{L.C}} \quad (1.2.13)$$

Převrácenou hodnotou z fázové rychlosti získáme dobu τ , kterou potřebuje vlna k proběhnutí jednotkové dráhy trolejového vedení. Tuto dobu vypočteme pomocí vztahu

$$\tau = \frac{1}{v} = \frac{\alpha}{\omega} = \sqrt{L.C} \quad (1.2.14)$$

1.2.2 Nehomogenní TV a jeho vliv

Homogenní vedení v reálné praxi je nerealizovatelné. Ke skutečnému vedení jsou totiž připojeny různé prvky se soustředěnými parametry a nebo zde mohou být připojena i jiná vedení s vlnovým odporem, jehož hodnota může být odlišná od hodnoty původního vedení. Těmito místy, kde k tomuto připojování dalšího vedení nejčastěji dochází, jsou zhlaví železničních stanic, místa připojení kabelových vedení atd. Dále se také parametry mohou měnit na místě s ocelovými mostními konstrukcemi a také se mění v místě, kde je elektrické hnací vozidlo připojené k trolejovému drátu.

Velikost amplitudy přepěťové vlny prošlé a dopadající v takovémto případě můžeme vypočítat dle vztahu

$$U_{pr} = 2U_{dop} \frac{Z_{c2}}{Z_{c1} + Z_{c2}}, \quad (1.2.15)$$

$$U_{odr} = U_{dop} \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c2} + Z_{c1}} \quad (1.2.16)$$

kde Z_{C1} představuje vlnový odpor přívodního vedení a

Z_{C2} představuje vlnový odpor připojeného vedení.

Za podmínky $Z_{C2} < Z_{C1}$ bude poté amplituda napětí prošlé vlny U_{pr} větší než amplituda dopadající vlny U_{dop} . K této situaci dochází například při přechodu vlny z kabelového vedení na vedení vzdušné. Pokud však rázová vlna s přepětím prochází naopak, to znamená ze vzdušného vedení na vedení kabelové $Z_{C2} > Z_{C1}$, potom je amplituda prošlé vlny menší, než amplituda vlny dopadající na rozhraní. Tohoto faktu se v praxi využívá tak, že se spotřebič k dlouhému vedení připojuje přes kabel. V tomto případě nezáleží na délce kabelu [4].

Podobné podmínky platí i pro odraženou přepěťovou vlnu, která je dána vztahem (1.2.16). Tudíž je-li $Z_{c1} > Z_{c2}$, bude odražená přepěťová vlna mít opačné znaménko. Pokud, ale bude platit $Z_{c2} > Z_{c1}$ nastane situace, že odražená přepěťová vlna bude

bez změny znaménka. V situace, že velikosti vlnových odporů se budou rovnat ($Z_{c2} = Z_{c1}$), k odraz nedojde.

Běžným případem je pro naši potřebu rozvětvení trolejového vedení v železniční stanici na zhlaví. S menší nepřesností je tudíž možno přijmout předpoklad, že trolejová vedení jednotlivých staničních kolejí mají stejnou vlnovou impedanci jako trolejové vedení širé trati [4]. Potom tedy lze vztahy pro odraženou a procházející vlnu napsat jako:

$$U_{odr} = U_{dop} \frac{1-n}{1+n}, \quad (1.2.17)$$

$$U_{pr} = U_{dop} \frac{2}{1+n}, \quad (1.2.18)$$

kde n představuje počet kolejí v železniční stanici.

Po rozboru těchto rovnic lze tedy říci, že čím je trolejové vedení v železniční stanici rozsáhlejší, tím menší část dopadající přepěťové rázové vlny pronikne do staničních kolejí. Dále lze říci, že odražená vlna je tím větší čím je rozsáhlejší staniční vedení. Vlna se ale odráží s opačným znaménkem. Postupně tedy snižuje vrcholovou hodnotu dopadající vlny.

Dalším místem v provozu, kde dochází k výskytu odrazu vlny, je dopad vlny na otevřený konec vedení. Otevřený konec vedení je charakteristický tím, že má trvale nulový proud. Proudová vlna o velikosti proudu I se musí tedy v místě otevřeného konce vedení přetransformovat v odraženou proudovou vlnu velikosti I . Je to z toho důvodu, že proudová vlna nemůže postupovat dále otevřeným koncem. Proudová vlna je opět provázena odraženou vlnou napěťovou, jejíž polarita je souhlasná s hodnotou došlé napěťové vlny. Z energetického hlediska zde dochází k proměnám elektrické energie na magnetickou a naopak [4].

1.3 Rázová charakteristika trakční měnirny

Trakční měnirny pro soustavu 3 kV DC, které se používají v provozu ČD, mají dvanáctipulzní můstkové schéma. Proto je nutno z hlediska vlastností měnirny zabývat se odděleně chováním vůči straně napájecího napětí a straně usměrněného

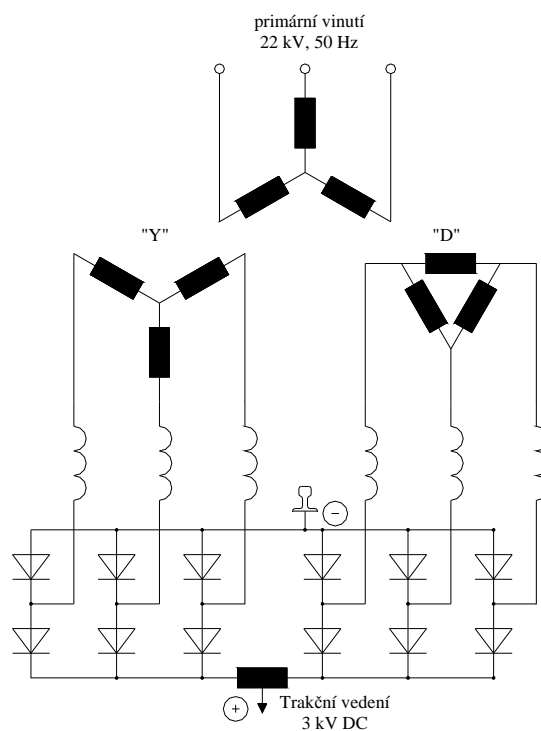
napětí. Obvykle každá usměrňovací jednotka je na straně usměrněného napětí vybavena do série zapojeným vzduchovým reaktorem o velikosti 4 mH.

1.3.1 Trakční napájecí stanice na 3 kV DC vůči napájecí síti

Trakční napájecí stanice jsou připojeny na soustavu 22 kV, 50 Hz. Toto připojení může být realizováno přímo s dodavatelem elektrické energie, nebo pomocí rozvodny 110/22 kV, 50 Hz v majetku ČD.

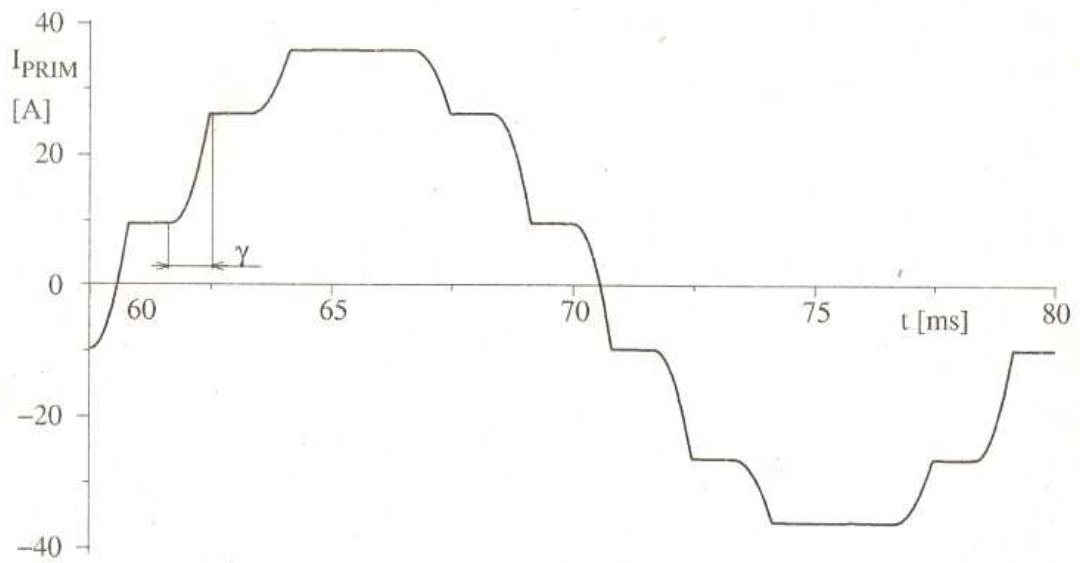
U ČD se používá zapojení trakčního usměrňovače v provedení dvanáctipulzním, a to buď s nulovou tlumivkou, nebo bez nulové tlumivky. Toto dvanáctipulzní zapojení využívá dvou paralelně pracujících trojfázových můstků. Původně toto schéma bylo navrženo ze dvou důvodů. V první řadě je výstupní napětí usměrňovače méně zvlňené, než je u šestipulzních zapojení, která se využívají v měnících MHD. Tato výhoda spočívá v tom, že se omezí rušivý vliv na souběžná sdělovací kabelová vedení aniž by bylo za potřebí použít filtry usměrněného výstupního napětí. V druhé řadě je každé sekundární vinutí transformátoru usměrňovače protékáno proudem dvakrát za periodu napájecího napětí. Tento fakt podpořil v padesátých letech snahu o získání potřebného materiálu (Cu) na výrobu usměrňovačových transformátorů.

V současné době je předností tohoto zapojení ještě ta skutečnost, že primární proud odebíraný z přívodního vedení dodavatele elektrické energie neobsahuje harmonické do frekvence 550 Hz, což je 11 harmonická.



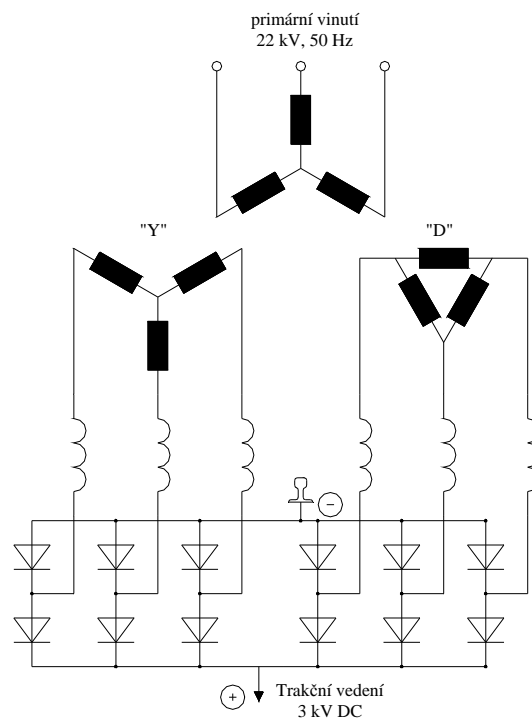
Obr. 5: Schéma trakčního usměrňovače s nulovou tlumivkou

Funkce nulové tlumivky zapojené mezi kladné vývody obou můstků spočívá v tom, že oddělí obě sekce v oblasti komutace proudu. Tímto opatřením bylo zajištěno, že komutace proběhne v každém z můstků samostatně. Výsledkem toho bylo, že se dalo uvažovat zapojení dvou samostatných šestipulzních usměrňovačů. Každý z těchto šestipulzních usměrňovačů přidává do celkového primárního proudu určitou část energie, čímž primární proud usměrňovače dostává časový průběh přibližného tvaru základní sinusovky. Tento průběh je pak znázorněn na následujícím obrázku, platící pro podstatně vyhlazený usměrňovaný proud.



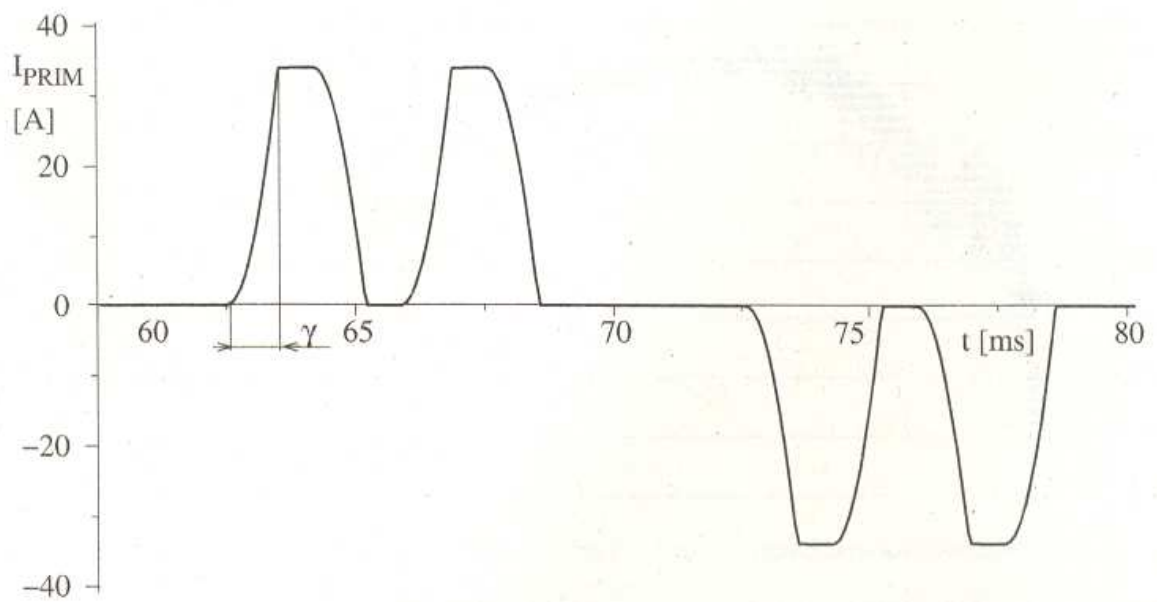
Obr. 6: Celkový primární proud dvanáctipulzního usměrňovače [1]

Úhel γ nám na tomto obrázku reprezentuje úhel překrytí

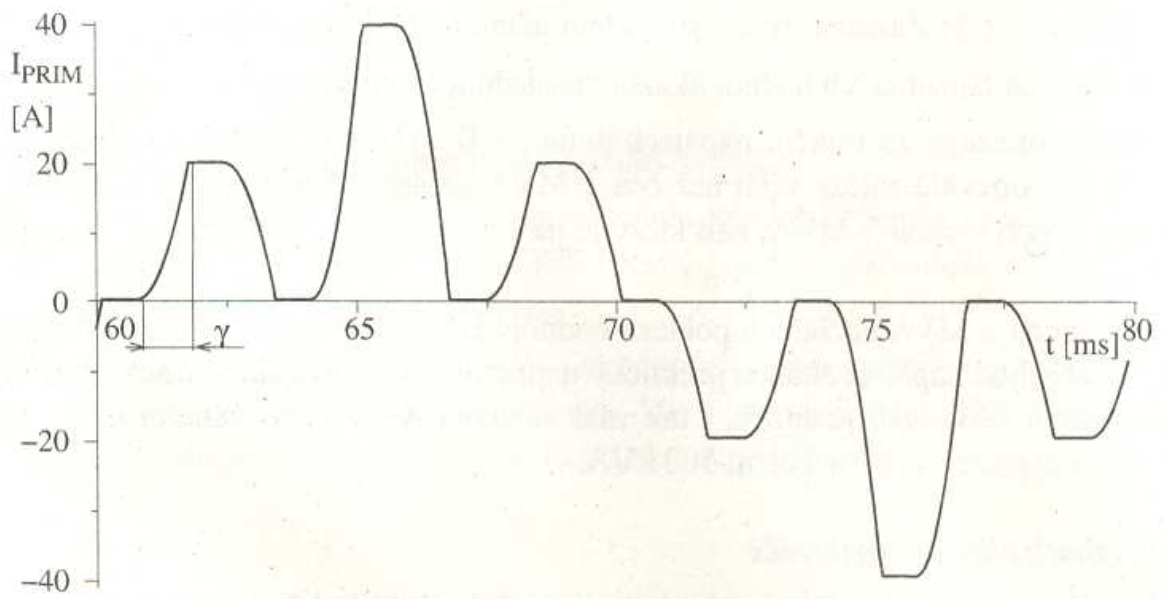


Obr. 7: Schéma trakčního usměrňovače bez nulové tlumivky

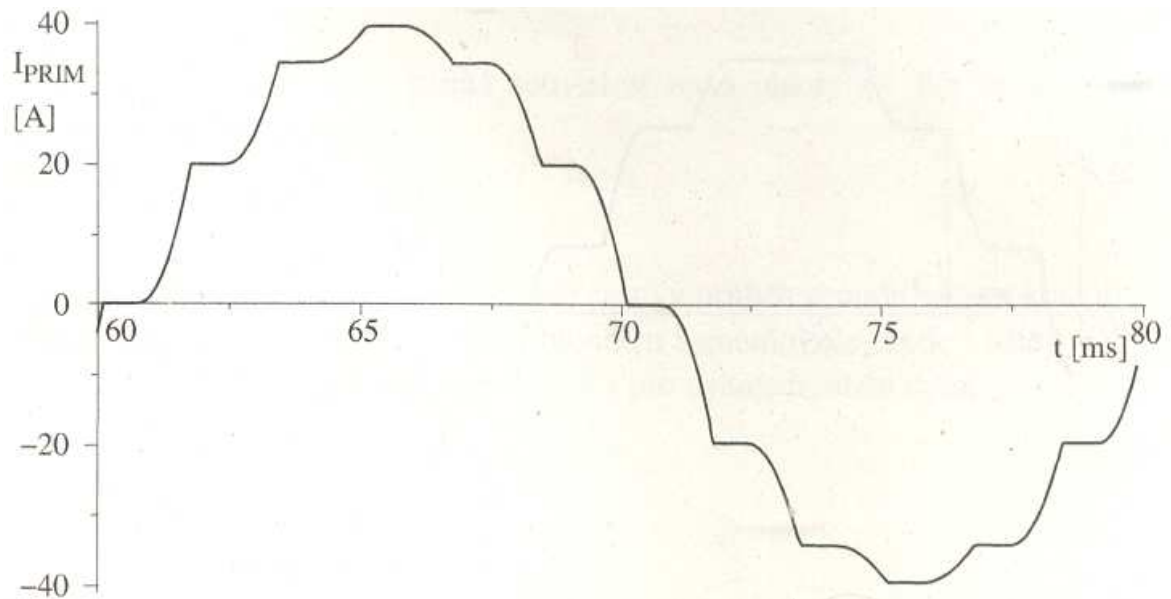
V případě, že není použita nulová tlumivka, je primární proud tvořen součtem sekcí Y a D.



Obr. 8: Primární proud Y sekce pro dvanáctipulzní usměrňovač bez nulové tlumivky [1]



Obr. 9: Primární proud D sekce pro dvanáctipulzní usměrňovač bez nulové tlumivky [1]
 Výsledný průběh těchto sekcí je pak dán na následujícím obrázku.



Obr. 10: Celkový primární proud dvanáctipulzního usměrňovače bez nulové tlumivky [1]

V tomto obvodu, jak je patrné, probíhají složité pochody během jednotlivých komutací proudu v diodách můstku. V dvanáctipulzním usměrňovači totiž komutují vždy dvě diody různých můstků.

Pro stanovení délky doby komutace diody se dá pro tento typ zapojení zvolit princip výpočtů založený na šestipulzním schématu, ale určité parametry budou vykazovat určité rozdíly. Oproti šestipulznímu schématu má totiž podle [1] napětí přivedené na dvojici náhradních indukčností transformátoru L_{TT} ze dvou fázových napětí u_r a u_s vzájemnou fázovou polohu 30° a platí tedy

$$u_{R1} - u_{R2} = -\frac{\sqrt{2} * U_2}{2} * \sin(\omega t) \quad (1.3.1)$$

kde U_2 je efektivní hodnota fázového napětí.

Okamžitou hodnotu proudu v diodě i_{D1} , ve které během komutace bude klesat proud dostaneme dle vztahu:

$$i_{D1} = -\frac{U_2}{2 * \sqrt{2} * \omega * L_{TT}} * [1 - \cos(\omega t)] + I_{DC} \quad (1.3.2)$$

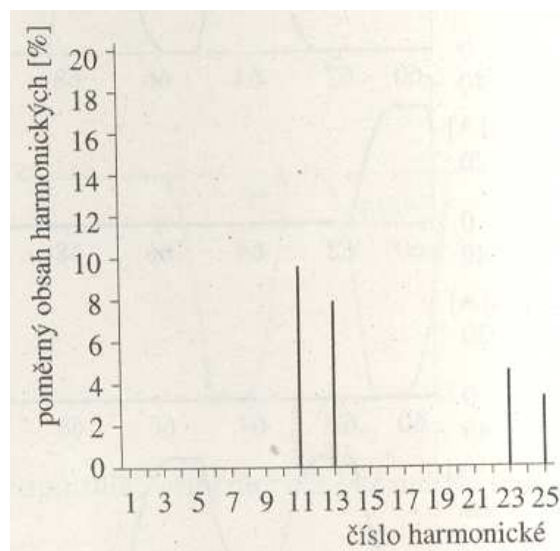
I_{DC} je vyhlazený usměrněný proud, který je přibližně roven konstantě. Tuto hodnotu proudu získáme součtem proudu v diodě i_{D1} , ve které během komutace bude klesat proud, a proudu v diodě i_{D2} , kde během komutace bude proud narůstat. Proud I_{DC} je tedy dán vztahem:

$$i_{DC} = i_{D1} + i_{D2} \quad (1.3.3)$$

Ze vztahu (1.3.2) dostaneme za podmínek, že období komutace začalo v okamžiku $\omega^*t = 0$ a skončilo v okamžiku $\omega^*t = \gamma$, kdy $i_{D1} = 0$, vztah:

$$\cos \gamma = 1 - \frac{\sqrt{8} * \omega^* L_{TT} * I_{DC}}{U_2} \quad (1.3.4)$$

Z časových průběhů celkového primárního proudu dvanáctipulzního usměrňovače, dle materiálů [1], nám spektrální analýza udává, že se vyskytují pouze spektrální složky 11., 13., 23., 25. atd. harmonické. Složky 5., 7., 17., 19. atd. harmonické se mezi sebou vyruší, jelikož mají stejné amplitudy, avšak opačné fázové úhly. Toto platí však pouze za předpokladu, že rozptylové indukčnosti obou sekcí transformátoru dvanáctipulzního usměrňovače mají stejné velikosti. Spektrální složení časových průběhů primárního proudu je pro obě varianty totožné. Nezáleží totiž na tom zda je či není použita nulová tlumivka.



Obr. 11: Spektrum primární proud dvanáctipulzního usměrňovače [1]

Výše zmíněné frekvenční složky proudu přivádí trakční napájecí stanice do napájecí sítě jako generátor proudu. Tyto složky jsou tedy přiváděny do napájecí sítě jako nezávislé na vstupní hodnotě impedance napájecí sítě pro tyto kmitočty. Důsledkem toho jest vznik napěťových harmonických v bodě, kde dochází k připojení napájecí stanice k síti dodavatele elektrické energie. Hodnota napěťových harmonických závisí nejen na hodnotě proudových harmonických daných zátěží

napájecí stanice, ale podle Ohmova zákona i na vstupní impedanci napájecí sítě dodavatele elektrické energie na uvedených frekvencích.

1.3.2 Trakční napájecí stanice na 3 kV DC vůči trakčnímu vedení

Výstupní napětí z trakčního usměrňovače obsahuje dvě základní složky. První z nich je složka stejnosměrná, která nám dává trakční napětí o velikosti 3 kV DC. Tato stejnosměrná složka je určena střední hodnotou zvlněného výstupního napětí. Druhou složkou je pak složka střídavé superpozice, jejíž spektrum je opětovně závislé na typu zvoleného schématu dvanáctipulzního usměrňovače.

V zapojení s dvanáctipulzním usměrňovačem, který využívá nulové tlumivky, je nutno analyzovat dvě varianty malého zatížení usměrňovače.

První variantou je myšlena ta možnost, že nulovou tlumivkou protéká tak malý proud, že se její indukčnost takřka neprojeví. Jádru tlumivky není totiž syceno, což představuje úplný chod na prázdko. Okamžitá hodnota výstupního napětí poté probíhá po vrcholech okamžitých hodnot napájecího napětí obou můstků. Střední hodnota je pak dána vztahem:

$$U_{DC,0} = \frac{U_2 * \sqrt{2} * 6}{\pi} * \int_{-\frac{\pi}{12}}^{+\frac{\pi}{12}} \cos(\alpha) * d\alpha \quad (1.3.5)$$

z čehož po dopočítání dle materiálu [1] dostaneme

$$U_{DC,0} = 1,398 * U_2 \quad (1.3.6)$$

Druhou variantou je to, že nulovou tlumivkou teče již dostatečná hodnota proudu. Většinou se uvažuje několik málo % jmenovitého proudu usměrňovače. To zapříčiní, že se funkce nulové tlumivky projeví oddělením obou můstků. Okamžitá hodnota výstupního napětí poté probíhá po aritmetickém průměru okamžitých hodnot výstupního napětí obou můstků. Střední hodnota je pak dána vztahem:

$$U_{DC,min} = \frac{U_2 * \sqrt{2} * 6 * \cos(15^\circ)}{\pi} * \int_{-\frac{\pi}{12}}^{+\frac{\pi}{12}} \cos(\alpha) * d\alpha \quad (1.3.7)$$

z čehož opět po dopočítání dle materiálu [1] dostaneme

$$U_{DC,min} = 1,350 * U_2 \quad (1.3.8)$$

Poměrné zvýšení výstupního napětí usměrňovače s nulovou tlumivkou pak nazýváme „nulovou špičkou“, která je dána vztahem (1.3.9) a nabývá hodnoty 3,55%.

$$\Delta U_{DC} = \frac{U_{DC,0} - U_{DC,min}}{U_{DC,min}} \quad (1.3.9)$$

Na nulové tlumivce vzniká při průchodu minimálního zatěžovacího proudu střídavé napětí s efektivní hodnotou, dle [1], o velikosti $0,134 * U_2$ a s frekvencí 300 Hz.

Při zapojení dvanáctipulzního usměrňovače bez nulové tlumivky se nám okamžitá hodnota výstupního napětí pohybuje po vrcholech časového průběhu napájecího napětí. Střední hodnota výstupního napětí pro malé zatížení je dána rovnicí (1.3.5) pro $U_{DC,0}$.

Pro větší zatížení dvanáctipulzního usměrňovače se uplatní komutační úbytek. Tento úbytek je způsoben komutací proudu mezi dvěma po sobě pracujícími diodami. Úbytek je také závislý na úhlu překrytí proudů.

Spektrální složky střídavé superpozice pro dvanáctipulzní usměrňovač, podle zdroje [1], vykazují kmitočty pouze ve velikosti 600 Hz, 1200 Hz, 1800 Hz atd. Jedná se vždy o násobky 600 Hz. Efektivní hodnoty složek střídavé superpozice výstupního napětí jsou tedy závislé na úhlu překrytí. Čím je úhel překrytí větší, tím se právě zvětšují i efektivní hodnoty střídavé superpozice výstupního napětí. Tyto složky pak dosahují pro jmenovité zatížení v procentech napětí na prázdno těchto hodnot:

pro 600 Hz cca 2 %

pro 1200 Hz cca 1,1 %.

Pro tyto složky se tedy trakční napájecí stanice chová jako zdroj napětí, proto hodnoty proudových složek výše zmíněných frekvencí jsou závislé na impedanci vnějšího trakčního obvodu na těchto frekvencích.

1.3.3 Vliv vzduchového reaktoru na trakční měřírnu

Tento vzduchový reaktor slouží k tomu, aby omezoval strmost nárůstu zkratového proudu. Reaktor je pak možno umístit do zpětné větve. Tato větev pak přivádí zpětné proudy pomocí kabelových vedení přes zmíněný vzduchový reaktor zpět do usměrňovače. Tato varianta je pak použita u několika měření na severní Moravě. Druhou možností je umístit vzduchový reaktor je zařadit ho do plusové větve. Tato varianta je pak využívána u ostatních měření.

Ke zkratům většinou dochází z důvodů provozních nedostatků. Mezi tyto nedostatky způsobující zkrat lze např. zařadit závadu na sběračích hnacího vozidla, uvolněním nákladů či střechy krytých nákladních vozů, vjezd na beznapěťový úsek trolejového vedení a nebo vjezd do ukolejného úseku trolejového vedení. Tento zkrat pak může nastat v bezprostřední blízkosti napájecí stanice. Zkrat potom vede ke značným dynamickým silám, které pak především působí na vinutí trakčního transformátoru. Proto musí zkratové ochrany zavčas identifikovat zda se jedná o poruchu, či reálný odběr proudu, k čemuž právě slouží vzduchovým reaktor a pokud jde o poruchu tak ji selektivně vypnout.

Časový průběh zkratového proudu u stejnosměrné soustavy 3 kV je pak popsán pomocí exponenciální křivky, kterou můžeme vyjádřit pomocí vztahu:

$$I_z(t) = \frac{U_0}{R} * \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) = \frac{U_0}{R} * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (1.3.10)$$

kde $i_z(t)$ představuje okamžitou hodnotu zkratového proudu [A],

U_0 je napětí měřírny na prázdno [V],

R je celkový odpor zkratového obvodu [Ω],

L je celková indukčnost zkratového obvodu [H] a

τ je časová konstanta zkratového obvodu jako celku [s] která je dána vztahem:

$$\tau = \frac{L}{R}. \quad (1.3.11)$$

Jak již bylo zmíněno, je posuzována dynamika zkratového proudu. Důležitá je strmost nárůstu zkratového proudu, která se dá vyjádřit pomocí di_z/dt .

Z této derivace nám pak plyne, že strmost nárůstu zkratového proudu není závislá na činném odporu R zkratového obvodu a bude největší v počátku zapůsobení zkratu ($t = 0$).

Dále se dá odvodit, že ustálená hodnota zkratového proudu ($t \rightarrow \infty$) nezávisí na indukčnosti zkratového obvodu a zároveň je dána pouze hodnotou činného odporu.

2 Modelování rázové vlny atmosférického původu

2.1 Tvar rázové vlny podle IEC

Rázová vlna klasického tvaru slouží k napodobování poměrů vzniklých vlivem atmosférické činnosti. Nejčastěji se jedná o simulaci přímého úderu blesku, či vliv indukce při blízkém úderu blesku. Rázová vlna je pak podle časového průběhu definována délkou čela vlny a délkou půltýlu vlny. Půltýl vlny je taková doba, kde poklesne rázová vlna na 50 % své vrcholové hodnoty. Časové průběhy rázových vln se předpokládají jako lineární a to jak v oblasti čela vlny, tak i v oblasti týlu vlny.

Tvar normalizované rázové vlny, podle normy IEC, která se používá nejen ke zkoušení rázových charakteristik trakčních zařízení, je tedy definován, jako 1,2/50 μ s. 1,2 μ s nám v tomto případě představuje délku čela vlny, kdy vlna dosáhne svého maxima, a 50 μ s. je čas dosažení půltýlu rázové vlny.

Podle materiálu [8] lze jako příklad rázové vlny uvést následující obrázek, na kterém je znázorněna výše zmiňovaná rázová vlna 1,2/50 μ s s vrcholovou hodnotou 5 kA.



Obr. 12: Příklad rázové vlny s vrcholovou hodnotou 5 kA [8]

2.2 Podrobnější tvar rázové vlny

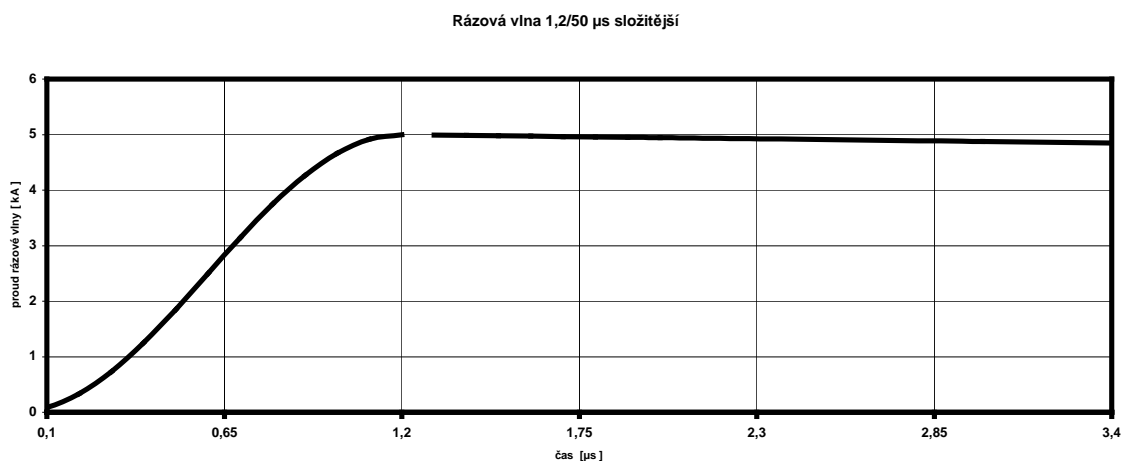
Podrobnější tvar rázové vlny 1,2/50 μs se pak dá popsat pomocí vztahu pro oblast čela, který je:

$$i(t) = \frac{I_{MAX}}{2} * (1 - \cos 2,6 * t) \quad \text{pro } 0 \leq t \leq t_{\text{čela}} \quad [A, \mu\text{s}], \quad (2.2.1)$$

a pomocí vztahu pro oblast týlu, který je:

$$i(t) = I_{MAX} * e^{[-0,014 * (t - t_{\text{čela}})]} \quad (2.2.2)$$

Průběh této vlny je pak znázorněn na obrázku 11, kde je zobrazen detail čela rázové vlny.



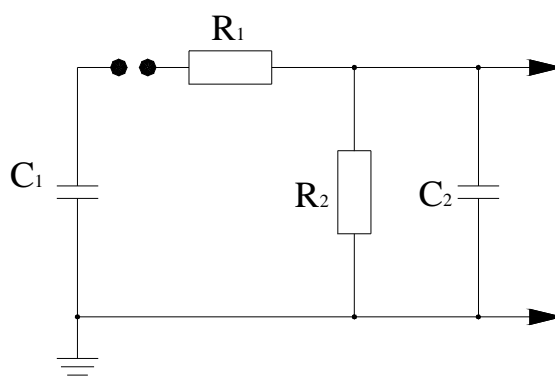
Obr. 13: Příklad složitějšího zobrazení rázové vlny s vrcholovou hodnotou 5 kA [8]

2.3 Modelování úderu bleskového výboje jako zdroje rázové vlny

Pro modelování úderu bleskového výboje v reálném prostředí se u našich drah použil zkušební generátor rázové vlny 1,2/50 μs , který odpovídá normě IEC. Tento zkušební generátor se také mimo jiné využíval pro zkoušky dielektrických rukavic a galoší.

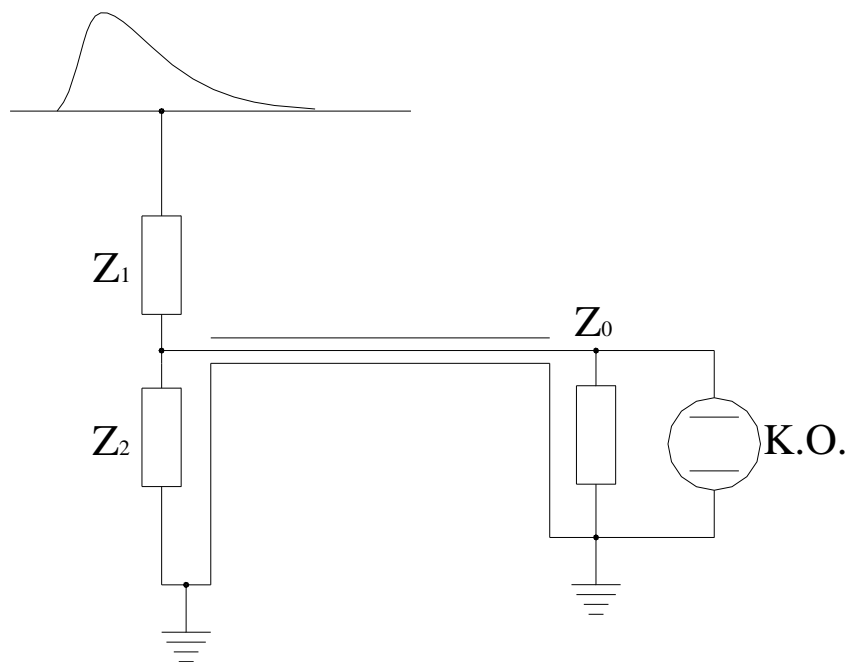
Generátor se skládal z vysokonapěťového usměrňovače, který umožňoval nastavovat hodnotu výstupního stejnosměrného napětí do 50 kV pomocí nabíjecího kondenzátoru C1. Dále obsahoval kulové jiskřiště, kde se dala mikroposuvem nastavovat vzdálenost obou kulových elektrod. Kalibrační křivka pak udávala

přeskokové napětí, jenž záviselo na nastavené vzdálenosti mezi oběma elektrodami. Pro stabilizaci kalibrace přeskokového napětí byl prostor mezi kulovými elektrodami trvale ionizován ozařováním ze zdroje radioaktivního záření. Výstupní tvar rázové vlny pak byl ovlivňován dvojicí bezindukčních rezistorů. R_1 sloužil pro nastavení čela vlny a byl tkaného provedení, a rezistor R_2 , který sloužil pro nastavení týlu vlny. Výstupní tvar rázové vlny byl pak také ovlivňován kapacitou vnějšího obvodu zátěže C_2 .



Obr. 14: Generátor rázové vlny [8]

K zaznamenávání průběhů z generátoru pak byla využívána měřicí souprava, která obsahovala kapacitní dělič napětí složený z impedancí Z_1 a Z_2 . Impedance Z_1 byla tvořena vysokonapěťovým kondenzátorem o velikosti 42 pF a impedanci Z_2 tvořilo několik přepínatelných bezindukčních kondenzátorů. Při přepínání těchto kondenzátorů byl zajištěn zkrat této impedance. Dále se záznamové zařízení skládalo z koaxiálního kabelu, který obsahoval přizpůsobovací rezistor Z_0 na straně osciloskopu. Katodový osciloskop (ve schématu označený K.O.), který se k tomuto účelu využíval, obsahoval zpožďovací linku, která zajišťovala přístup vstupního měřeného signálu na zesilovač svislého vychýlení až po spuštění jednorázové časové základny. Stínítko katodového osciloskopu pak bylo doplněno světlotěsnou skříňkou, která obsahovala elektricky ovládaný fotoaparát s vysoce světelným objektivem.



Obr. 15: Záznamové zařízení pro generátor rázové vlny [8]

Úder bleskového výboje se dá také modelovat pomocí počítače za pomoci softwaru PSpice. V tomto programu k tomu účelu je možno využít nezávislý zdroj napětí typu EXP. Tento zdroj dokáže vygenerovat rázovou napěťovou vlnu, jejíž výstupní průběh bude složen ze dvou průběhů. Jedná se o průběhy exponenciálního typu, jenž mají vzrůstající a klesající charakter. Tento průběh je pak možno vidět v příloze číslo 1, kde je použita vrcholová hodnota napětí 1 V. Na detailu průběhu je dobře patrné, že v době půltýlu vlny dosahuje napětí 50% vrcholové hodnoty.

Druhým způsobem jak modelovat rázovou vlnu v programu PSpice, je pomocí nezávislého zdroje napětí typu PWL. Průběh tohoto zdroje je zadán pomocí tabulky s hodnotami, které definují klíčové body průběhu. Mezilehlé body program lineárně interpoluje. Jednotlivé hodnoty jsou pak převzaty ze zdroje [5]. Opět je vidět v příloze číslo 2, že v době půltýlu vlny dosahuje napětí 50% vrcholové hodnoty.

Třetím způsobem jak můžeme simulovat rázovou vlnu, je pomocí nezávislého zdroje napětí typu PULSE. Průběh tohoto zdroje je pulzového charakteru a je dán pomocí náběžné hrany, šířky pulzu a dobou sestupné hrany. Výsledky simulace jsou pak uvedeny v příloze číslo 3.

3 Zákonitosti odrazů rázové vlny

3.1 Charakteristika bodů TV z hlediska odrazů rázové vlny

Jak již bylo výše uvedeno TV lze považovat za vedení elektricky dlouhé s rozprostřenými parametry. V reálné praxi však toto vedení není homogenní. Ke skutečnému vedení jsou připojeny různé prvky se soustředěnými parametry, nebo vedení s vlnovým odporem, který se může lišit od vlnového odporu původního vedení.

Pomocí vlnových odporů lze poté za definovat několik dalších parametrů, potřebných k zjišťování odrazů rázových vln. Prvním parametrem, který si můžeme za definovat, je **činitel prostupu napěťové vlny** označovaný T_u , který je dán vztahem dle zdroje [5]:

$$T_u = \frac{U_{pr2}}{U_{pr1}} = \frac{2 * Z_{c2}}{Z_{c1} + Z_{c2}}, \quad (3.1.1)$$

kde U_{pr1} je napětí přímé (prošlé) vlny na přívodním vedení [V]

U_{pr2} je napětí přímé (prošlé) vlny na připojeném vedení [V]

Z_{c1} je charakteristická impedance přívodního vedení [Ω]

Z_{c2} je charakteristická impedance připojeného vedení [Ω].

Stejným způsobem je za definován i druhý parametr, kterým je **činitel prostupu proudové vlny** označovaný T_i , který je dán vztahem dle zdroje [5]:

$$T_i = \frac{I_{pr2}}{I_{pr1}} = \frac{2 * Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c2}}, \quad (3.1.2)$$

kde I_{pr1} je proud přímé (prošlé) vlny na přívodním vedení [A]

I_{pr2} je proud přímé (prošlé) vlny na připojeném vedení [A].

Dalším parametrem (opět napěťovým) je **činitel odrazu napěťové vlny**, který je označován ρ_u a dán vztahem:

$$\rho_u = \frac{U_{odr1}}{U_{pr1}} = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c2}}, \quad (3.1.3)$$

kde U_{odr1} je napětí zpětné (odražené) vlny na přívodním vedení [V].

Posledním parametrem jest **činitel odrazu proudové vlny** označovaný ρ_i a dán vztahem:

$$\rho_i = \frac{I_{odr1}}{I_{pr1}} = \frac{Z_{c1} - Z_{c2}}{Z_{c1} + Z_{c2}}, \quad (3.1.4)$$

kde I_{odr1} je proud zpětné (odražené) vlny na přívodním vedení [A].

Vztahy 3.1.1 až 3.1.4 lze aplikovat na jakékoliv místo na vedení, a však zde se budeme zabývat čtyřmi základními případy. Prvním z nich je situace, kdy se stýkají dvě vedení se stejnou vlnovou impedancí. V tomto případě projde vlna bez odrazu a činitelé odrazu napěťové a proudové vlny budou mít hodnotu 0. Činitelé prostupu proudové a napěťové vlny budou pak rovny 1, což znamená, že proudová i napěťová vlna projde celá.

V druhém případě je vedení Z_{c2} zakončeno zkratem a bude platit $Z_{c1} \gg Z_{c2}$. V takovém to případě budou mít činitelé prostupu hodnotu 0, což znamená, že do druhého vedení neprojde žádná část vlny. Činitel odrazu napěťové vlny bude mít hodnotu -1 , což znamená, že napěťová vlna se bude odrážet s opačným znaménkem a v součtu vln dopadající a odražené, bude napětí při nulové impedanci rovno nule. Činitel odrazu proudové vlny bude pak nabývat hodnoty 1.

Ve třetím případě bude vedení zakončeno nekonečně velkou impedancí, což se dá napsat jako $Z_{c2} \gg Z_{c1}$. Tento případ bude odpovídat otevřenému konci vedení, kdy hodnota Z_{c1} bude natolik malá oproti Z_{c2} , že ji můžeme zanedbat. Činitel odrazu napěťové vlny nabývá pak hodnoty 1, kdežto činitel odrazu proudové vlny nabývá hodnoty -1 . Proudová vlna se pak odráží s opačným znaménkem a v součtu proudových vln dopadající a odražené je proud v tomto místě roven nule.

Ve čtvrtém případě, kdy uvažujeme rozdílné impedance, aniž by se jednalo o zkratované, či otevřené vedení, budou se vlny odrážet a dopadat dle výše uvedených vzorců (3.1.1 až 3.1.4). Obecně však bude platit, že pro odraženou napěťovou vlnu, kde nastane případ $Z_{c1} > Z_{c2}$, bude mít odražená napěťová vlna opačné znaménko. Jestliže však $Z_{c2} > Z_{c1}$, nastává napěťový odraz beze změny znaménka.

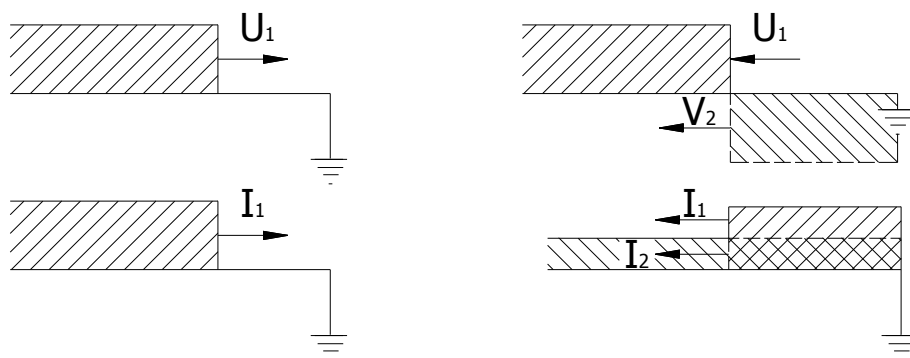
Lze tedy říci, že k odrazům rázových vln dochází na nehomogenitách TV. Typickými příklady, kde se projevují nehomogenity na TV, kde za TV považujeme trolejové vedení a zpětné vedení, jsou místa, ve kterých se spojují vedení s rozdílnou vlnovou impedancí a místa, kde jsou připojeny prvky se soustředěnými parametry. Za tyto místa lze považovat:

- styk vnitřní sběrnice TNS s kabelovým napájecím vedením
- styk kabelového napájecího vedení s vedením trolejovým
větvení trolejového vedení (zhlaví železničních stanic)
- otevřené konce trolejového vedení
- připojení prvků se soustředěnými parametry (napájení netrakčních odběrů z trakční sítě – Univerzální Napájecí Zdroj).

Některé z těchto jmenovaných bodů si pak charakterizujeme v následujících odstavcích.

3.1.1 Místo zkratu na vedení

Je to jedno z dalších míst elektrické nehomogenity dlouhého vedení, se kterým se můžeme setkat v železniční praxi, i když to není obvyklý provozní jev. Po elektrické stránce lze místo zkratu charakterizovat jako bod, ve kterém se nemůže objevit napětí. Napěťová vlna, která k tomuto místu přijde, se v plné velikosti odrazí, ale s opačnou polaritou. Prostupující vlna však dle definice místa zkratu bude nulová. Odražená proudová vlna musí pak mít opačnou polaritu než odražená vlna napěťová, v tomto případě bude polarita kladná.

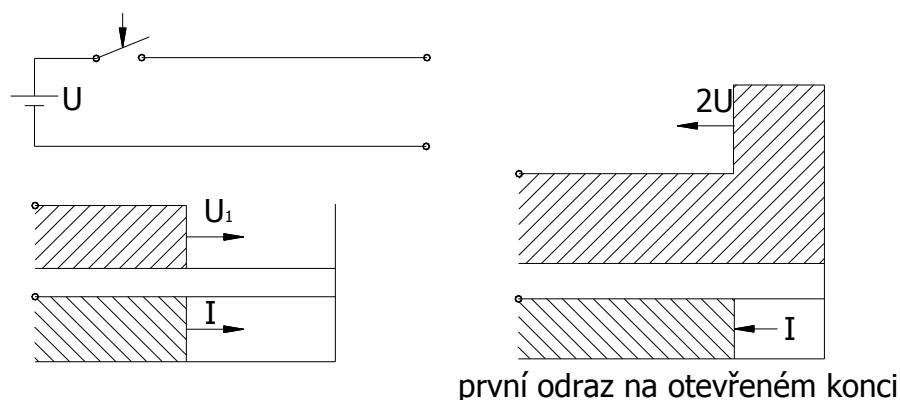


Obr. 16: Odraz rázové vlny na dlouhém vedení při zkratu [9]

Z energetického hlediska víme dle zdroje [9], že prostupující napěťová i proudová vlna nesou stejný díl energie. Napěťová vlna pak formou elektrického pole a proudová vlna pak formou magnetického pole. Jelikož při zkratu odražená napěťová vlna nuluje napětí na vedení a energie původního elektrického pole nemůže v bezztrátovém vedení zaniknout, proto přebírá její podíl magnetické pole. To vede k zvětšení velikosti proudové vlny.

3.1.2 Otevřený konec vedení

Otevřený konec vedení je druhou možností, s kterou se můžeme v provozu setkat. Tato varianta je charakterizována trvale nulovým proudem. Z toho vyplývá, že proudová vlna I , která dorazí na otevřený konec dlouhého vedení, musí přejít na odraženou proudovou vlnu s velikostí $-I$. Tato vlna totiž nemůže prostupovat otevřeným koncem vedení. Proudová vlna je opět doprovázena odraženou vlnou napěťovou, jejíž polarita má stejnou hodnotu, jako došlá napěťová vlna.



Obr. 17: Odraz rázové vlny na dlouhém vedení při otevřeném konci [9]

Z energetického hlediska opět dochází k přeměně elektrické energie na energii magnetickou a naopak.

3.1.3 Styk vedení s různými vlnovými impedancemi

Do tohoto lze zařadit místa styku trolejového vedení s ostatními trakčními vedeními. V těchto případech bude docházet k částečnému odrazu rázové vlny. Velikost odražené vlny se pak bude řídit dle výše uvedených vztahů.

Jedná se zde o případy, kdy vlnové impedance obou vedení budou v rozmezí do 0 do ∞ . V tomto rozmezí bude docházet k částečným odrazům a k částečným prostupům rázové vlny. Prostupující vlna, ať už se bude jednat o napěťovou či proudovou vlnu, bude mít vždy stejnou polaritu. Polarita bude zachována při jakémkoliv poměru vlnových impedancí. Amplituda však bude dána pomocí výše zmíněných vztahů. Amplitudy odražené i prostupující vlny budou vždy snižené oproti amplitudě dopadající vlny, jelikož pro místo styku musí platit Kirchhoffovy zákony [5]. Pokud označíme Z_{C1} za vlnovou impedanci přírodního vedení, odkud vlny přicházejí a Z_{C2} za vlnovou impedanci připojeného vedení, do kterého vlny vstupují, můžeme prohlásit tyto závěry. Pokud $Z_{C1} > Z_{C2}$ odrazí se napěťová vlna s opačnou polaritou a proudová vlna si zachová totožnou polaritu. Avšak pokud $Z_{C1} < Z_{C2}$ nastává případ, že se napěťová vlna odrazí se stejnou polaritou, ale proudová vlna bude mít opačnou vzhledem k polaritě vlny dopadající.

3.1.4 Vliv napájecí a spínací stanice

Napájecí i spínací stanici si můžeme z hlediska šíření přepětových vln představit jako prvek se soustředěnými parametry. Tato nehomogenita může pak ovlivňovat tvar odražené přepětové vlny. Podle zdroje [4] se dá vliv přístrojů na napájecích stanicích charakterizovat jako nepodstatný, s výjimkou trakčního transformátoru a v omezené míře také měřicích transformátorů. Také zanedbatelný vliv na tvar vlny má napájecí vedení mezi napájecí stanicí a trakčním vedením. Dá se tedy říci, že přepětová vlna projde přes napájecí vedení, portál a další zařízení v prakticky netlumené podobě. Pokud nastane případ, že vlna narazí na otevřený konec vedení, což se může stát při rozpojeném odpojovači či vypínači, dojde k úplnému odrazu vlny. Jako ochranu před tímto jevem lze využít ventilovou bleskojistku, která je umístěna na napáječových vývodech. Dle zdroje [4], se však ale nedoporučuje využívat jiskřišť. Jiskřiště mohou totiž při zapůsobení vyprodukovat kusou vlnu, která by mohla nebezpečně ohrozit napájecí transformátor.

3.1.5 Vliv hnacího vozidla

Vliv elektrického hnacího vozidla se projevuje pouze tehdy, je-li vozidlo připojeno přes sběrač a je zapnutý hlavní vypínač. V opačném případě, kdy je sice vozidlo

připojeno k troleji, ale není zapnut hlavní vypínač, je charakter takto vzniklého impedančního lomu zcela nepodstatný.

Dále je nutno rozlišovat hnací vozidla pro DC soustavu z hlediska konstrukce. Lze rozlišovat základní dva druhy konstrukce a to:

- klasické schéma, které je charakterizováno použitím rozjezdových rezistorů a sériových trakčních motorů, které lze řadit do skupin během rozjezdu,
- schéma s maloztrátovým rozjezdem, kde je využíváno regulace pomocí pulzních měničů.

V prvním případě představuje hnací vozidlo vůči trakční napájecí soustavě $R - L$ obvod, kde složka R je tvořena trakčním odběrem ze soustavy 3 kV a L se uplatní s ohledem na střídavou superpozici ve výstupním napětí trakční napájecí stanice DC soustavy.

V druhém případě je vozidlo vybaveno na vstupu $L - C$ obvodem, který je umístěn před pulzní měnič. Výkonový kondenzátor, který je připojen na trakční napětí, pak eliminuje indukčnost trakčního vedení. To je z důvodů, že pulzní měnič potřebuje pro svojí správnou funkci zajistit možnost strmého nárůstu proudu. Kapacita výkonového kondenzátoru je pak dána trakčním výkonem vozidla.

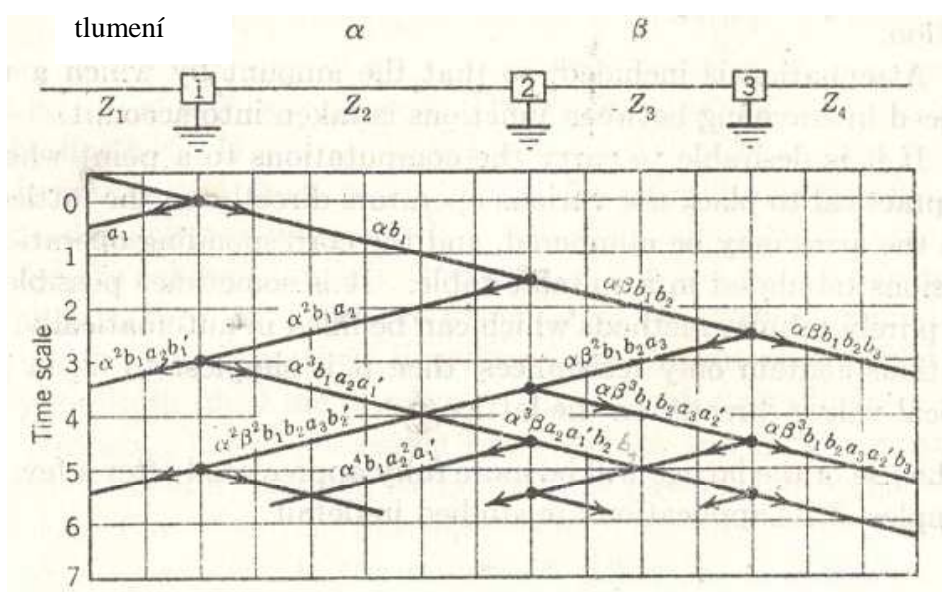
Dá se tedy konstatovat, že vozidla DC soustavy budou mít nepatrný vliv na průchod rázové vlny. Tento vliv bude dán velikostí jejich vstupních impedancí.

3.2 Bewley-ho mřížka

Bewley-ho mřížka je graficko-početní způsob jak sledovat průběh rázové vlny v závislosti na čase. Tento způsob sledování odrazu mřížkou lze použít v řadě různých případů. Dá se například použít i na situaci kdy je k vedení připojena jiná vlnová impedance či je vedení přizemněno. Na této situaci bude pak následovně popsán celý princip.

Vedení si můžeme rozdělit na několik krátkých úseků, podle toho, kde jsou jednotlivá místa přizemněna a dochází v nich k postupným odrazům rázové vlny. Jelikož je někdy velmi složité sledovat cestu těchto mnohonásobných postupných odrazů, je proto zvolen způsob sledování pomocí mřížky. Mřížka nám pak

znázorňuje diagram, kde je vynesena časová závislost na vzdálenosti jednotlivých míst, kde dochází k odrazu rázové vlny. Z tohoto diagramu je pak na první pohled patrná pozice a směr pohybu každého odrazu vlny. Zároveň je také patrný i lom vlny v systému, který je v našem případě představován přizemněným vedením, v každém časovém okamžiku. Navíc tato mřížka poskytne prostředky pro výpočet tvaru všech odražených vln a přináší jejich historii. Princip odrazu vlny, zobrazovaný pomocí mřížky je pak uveden na následujícím obrázku.



Obr. 18: Odraz mřížkou [11]

Na obrázku jsou znázorněna tři spojení, jejichž rozmístění je nerovnoměrné. Tyto spojení se mohou skládat z nějaké kombinace impedancí řazených v sérii nebo z rozvětvení, které může být i uzemněno. Složitost spojení impedancí s různým charakterem může být tak velká, že je pak vyloučeno její matematické řešení pomocí diferenciálních rovnic, a proto se situace řeší pomocí mřížky. Jelikož jednotlivá spojení mají rozdílnou vlnovou impedanci, mají tím pádem vlny i různou rychlost průchodu a rozdílný útlum. Konstrukce mřížky pak závisí na zvolení měřítka délky, které je závislé na bodech spojení jednotlivých rozdílných impedancích. Potom volíme vhodné měřítka svislé osy, na kterém se vynáší čas. Jak je znázorněno na výše uvedeném obrázku, je v mřížce zakreslen pomocí diagonál průchod vlny v závislosti na čase a na délce vedení. Výhodou kladení uzlů v intervalech v závislosti na časech přechodu vlny je, že diagonály mají stejný sklon a časové měřítka je použitelné pro každou větev. Ve vrcholu mřížky, v nějakém vhodném

místě na spojích jsou indikátory odrazu. Tyto indikátory odrazu mají operátory které představují:

a – operátor odrazu pro vlny přicházející z levé strany,

a^l – operátor odrazu pro vlny přicházející z pravé strany,

b – operátor lomu vlny přicházející z levé strany,

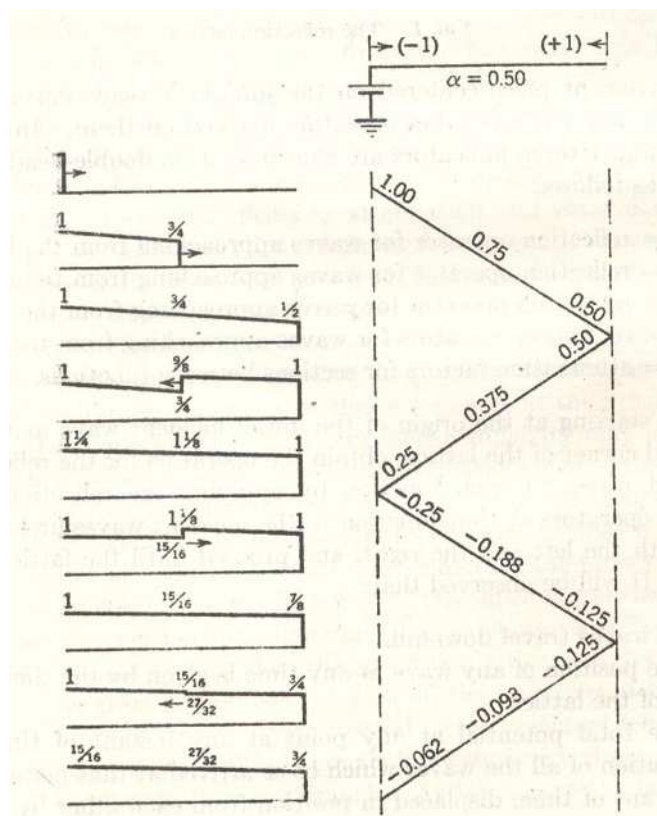
b^l – operátor lomu vlny přicházející z pravé strany,

α, β - činitel tlumení pro části mezi spojeními.

Začátek výskytu vlny (kde je umístěn zdroj) je v horním levém rohu mřížky. Potom získáme operátory pro odraz a lom vlny v každém spojení v dané aplikaci, kde nastává lom. Tato místa je pak nutno sledovat, protože:

- všechny vlny jsou kreslené pod stejným sklonem,
- pozice každé vlny je v každém okamžiku známá pomocí stupnice na mřížce,
- celkový potenciál v určitém čase a v nějakém bodě se dá získat pomocí superpozice všech vln, které prošly v určitém čase určitým bodem,
- dá se zjistit historie některé z vln, jelikož se dá vlna dobře nakreslit. Z grafického řešení se pak dá zjistit, jak vlna procházela, jaké vlny z ní vznikly a jaké vlny do ní vstoupily.
- tlumení je zahrnuto ve velikosti vlny, jenž se musí vzít v místě spojení v úvahu.
- pokud je žádoucí vztahovat výpočty k bodu, kde jsou umístěny rozdílné operátory a není je možno umístit přímo do mřížky, potom se mohou operátory očíslovat a odpovídající funkční výrazy sestavit do vhodného přehledu pomocí tabulky. Občas je možno navrhnout jen tabulkovou metodu, která může být automaticky doplněna. Pokud je spojení složeno pouze z odporu, tak je potom nejvýhodnější doplnit hodnoty operátorů přímo do mřížky.

Využití mřížky si můžeme následně předvést na příkladu dle zdroje [11]. Tento příklad je zaměřen na sledování vedení, které vede z DC zdroje proudu. Grafické zobrazení je vidět na následujícím obrázku.



Obr. 19: Charakter vedení z DC zdroje [11]

Tento obrázek ukazuje průběh tlumených vln a jejich postupný odraz na vedení s otevřeným koncem. Operátor odrazu na otevřeném konci vedení má hodnotu, jak již bylo výše zmíněno, +1 a operátor odrazu v generátoru je pak roven -1. Napětí je udržované na konstantní hodnotě a tak odražená vlna přicházející na zdroj je okamžitě vyrušena opačnou vlnou. Pro jednoduchost je zvoleno tlumení lineárního charakteru s 50% útlumem. Pokud by nebylo tlumení, oscilace by se neustále opakovaly. Jelikož jsou na vedení ztráty, jsou kmity postupně utlumovány, až na konec dosáhnou ustáleného stavu. Jelikož vedení si můžeme představit jako několik sériově řazených odporů, nemá po celé své délce stejný potenciál. Nicméně na vedení nejsou žádné rozptylové proudy. Jak je patrné z obrázku, je napětí v různých okamžicích, při tlumení $(1 - \alpha)$, vždy vyhlazené.

začátek vlny	čas	vlna přichází na konec
1	0	0
1	1	α
$1 + \alpha^2$	2	2α
1	3	$2\alpha - \alpha^3$
$1 - \alpha^4$	4	$2\alpha - 2\alpha^3$
1	5	$2\alpha - 2\alpha^3 + \alpha^5$
$1 + \alpha^6$	6	$2\alpha - 2\alpha^3 + 2\alpha^5$
1	7	$2\alpha - 2\alpha^3 + 2\alpha^5 - \alpha^7$
$1 - \alpha^8$	8	$2\alpha - 2\alpha^3 + 2\alpha^5 - 2\alpha^7$
Atd.		Atd.

Tab. 1: Hodnoty vlny dle obrázku 19 [11]

Napětí na začátku vedení po 4 krocích je poté dle zdroje [11] vypočteno dle vztahu:

$$U = 2 * (\alpha - \alpha^3 + \alpha^5 - \alpha^7) = 2\alpha * (1 - \alpha^2) * \sum_0^n \alpha^{4r} = 2\alpha \frac{1 - \alpha^{4(n+1)}}{1 + \alpha^2} \quad (3.2.1)$$

kde U představuje napětí. Pro neurčitý počet oscilací se pak dá napětí vypočíst dle vztahu:

$$U = \frac{2\alpha}{1 + \alpha^2} \quad (3.2.2)$$

Tak, že pokud je útlum stanoven na $(1 - \alpha) = 0,5$ a vedení méně ovlivňuje tvar vlny, na otevřeném konci je pak stabilizované napětí, které má po dosazení do vzorce (3.2.2) hodnotu:

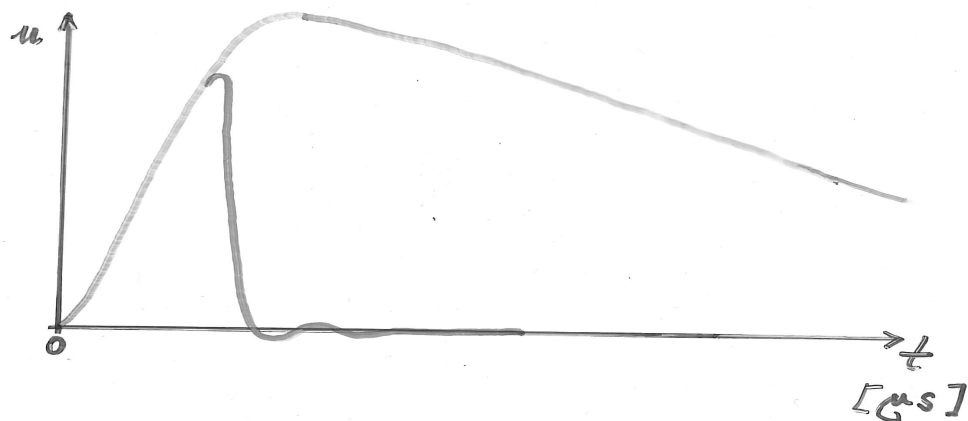
$$U = \frac{2 * 0,5}{1 + 0,25} = 0,8V$$

3.3 Příklad experimentálně zjištěných míst vzniku odrazů rázové vlny

Pro experimentální zjišťování míst vzniku odrazů rázové vlny se používal u ČSD zkušební generátor rázové vlny 1,2/50 μ s podle normy IEC. Tento typ generátoru je pak popsán v kapitole 2.3 modelování úderu bleskového výboje jako zdroje rázové vlny.

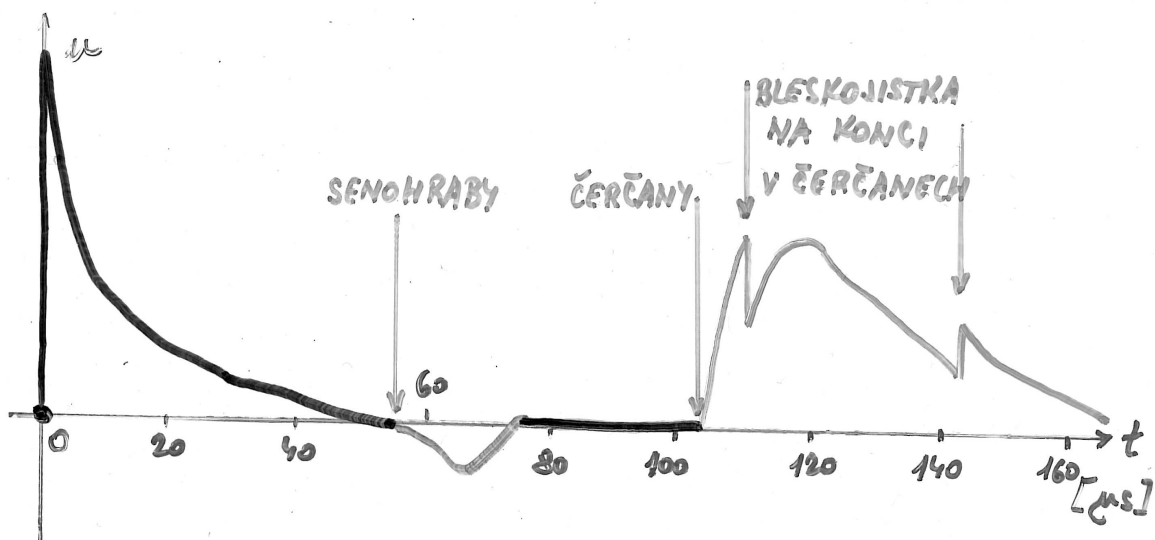
Pro analýzu šíření rázové vlny v TV, dle zdroje [8], se však nepodařilo akumulovat v kondenzátoru C_1 dostatek energie před vysláním vlny do TV, takže

místo normalizované rázové vlny IEC 1,2/50 μs se podařilo realizovat pouze kusou vlnu s podstatně kratší délkou půltýlu, která byla cca 10 μs . Tento nedostatek se nakonec ukázal jako výhoda při analýze odrazů na kratších délkách TV.



Obr. 20: Porovnání rázových vln IEC a vlny s půltýlem 10 μs [8]

Příkladem takového měření je pak podle zdroje [9] provedené měření na úseku Stránčice – Čerčany, který leží na trati Plzeň – České Budějovice. Následující obrázek nám pak ukazuje záznam jak se šířila rázová vlna s vrcholovou hodnotou 15 kV po TV.



Obr. 21: Šíření rázové vlny v úseku Stránčice – Čerčany [8]

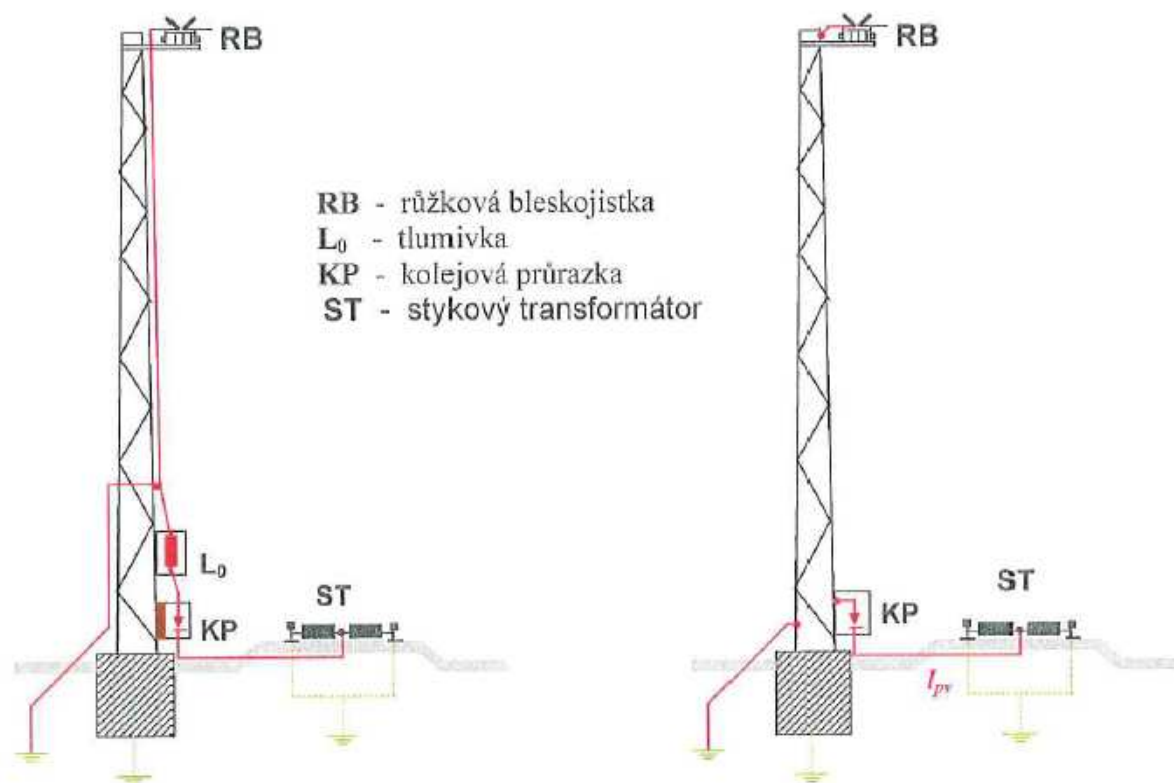
Tento sledovaný úsek byl dlouhý kolem 15 km. Sledovány byly dvě stanice. Také bylo na tomto úseku nataženo zesilovací vedení a trať byla křížována venkovními vedeními. Také se na tomto úseku nacházelo několik mostů, které křížovaly trať.

Na obrázku je pak vyznačeno několik bodů, kde došlo k odrazům rázové vlny. Prvním z těchto bodů je rozvětvení TV kolejiště v železniční stanici Senohraby. Zde se rázová vlna odrazila na poloviční hodnotě vlnového odporu ($Z_{c1} > Z_{c2}$). Vlna se odrazila tedy v opačné polaritě, než byla vlna odeslaná. Druhým bodem, kde došlo k odrazu, byl konec TV na zhlaví v železniční stanici Čerčany. Zde docházelo k odrazu na otevřeném konci TV ($Z_{c2} \gg Z_{c1}$). Odražená vlna měla tedy stejnou polaritu jako vlna odeslaná. Dalším místem, kde se projevil odraz rázové vlny, byl přeskok na růžkových bleskojistkách, které byly umístěny na zhlavích železniční stanice Čerčany. Tyto bleskojistky způsobily deformaci vlny, která přichází po odrazech na vedení zpět ke generátoru. Vliv zmiňovaných mostů se neprojevil jako možná příčina impedančního lomu.

4 Poměry po úderu blesku do stožáru TV

4.1 Elektrické parametry kovového stožáru TV a jeho výstroje

Jelikož je trakční vedení nejvýše ze všech zařízení na trati, má tím pádem největší pravděpodobnost, že do něj přímo udeří blesk. Proto lze říci, že trakční vedení elektrizovaných tratí slouží jako ochrana pevných zařízení v kolejišti před přímým úderem blesku. Kovové stožáry TV a jejich výstroj pak slouží ke svedení tohoto bleskového proudu přes kolejové průrazky do kolejí a svodovými odpory do země. Bleskový proud je na stožár TV přenášen prostřednictvím růžkových bleskojistek, které jsou umístovány tam, kde dochází ke změně impedance vedení. Nejčastěji se vyskytují na zhlavích železničních stanic, kde jsou růžkové bleskojistky umístěny na trakční vodiče hlavních kolejí.



Obr. 22: Uspořádání zařízení na stožáru TV – a) s tlumivkou L₀, b) bez tlumivky L₀ [6]

Podle obrázku 22 lze stanovit elektrické parametry stožáru TV. Některé parametry se ovšem mohou případ od případu lišit, a proto je zapotřebí, uvažovat ve výpočtech hodnoty průměrné.

Vstupním článkem pro bleskový proud je růžková bleskojistka (RB). S touto bleskojistkou je spojen první elektrický parametr, a to odpor uzemnění růžkové bleskojistky označovaný R_z a nabývající hodnotu okolo 10Ω . Dále se také předpokládá vliv zemního odporu železobetonového základu stožáru. Tento parametr se označuje jako R_{st} a jeho střední hodnota se podle materiálu [6] pohybuje okolo 25Ω . Tyto dva odpory (odpor uzemnění růžkové bleskojistky R_z a odporu železobetonového základu stožáru R_{st}) jsou řazeny paralelně a proto jejich hodnota R_{zst} je podle níže uvedeného vztahu vypočtena na $7,143 \Omega$.

$$R_{zst} = \frac{R_z * R_{st}}{R_z + R_{st}} = \frac{10 * 25}{10 + 25} = 7,1423\Omega \quad (4.1.1)$$

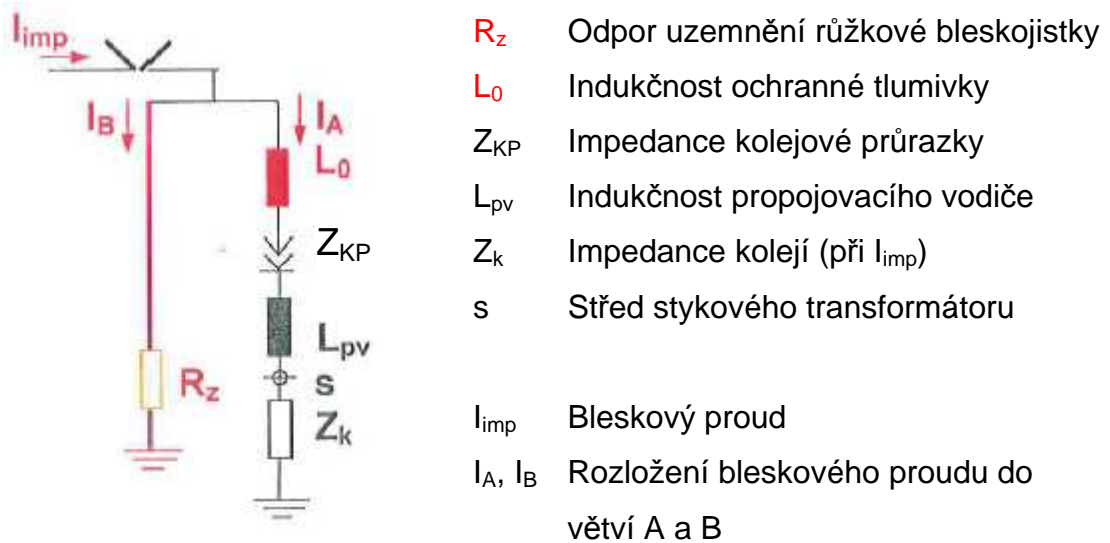
Dalším parametrem je indukčnost propojovacího vodiče označovaná jako L_{pv} . Tato indukčnost je proměnná v závislosti zda bude, či nebude použita ochranná tlumivka L_0 . Pokud budeme uvažovat přítomnost ochranné tlumivky (podle obrázku 21a), tak její hodnota je stanovena na $20 \mu H$. Posledním parametrem spojeným s výstrojí stožáru TV je impedance kolejové průrazky označovaná jako Z_{KP} . Hodnota této impedance je stanovena, podle [6], na 0Ω .

4.2 Náhradní obvod pro ukolejnění stožáru

Náhradní obvod pro ukolejnění stožáru nám umožní lépe pochopit jak se bleskový proud dostává do země, a jaké škody, či nepříjemnosti by mohl způsobovat. Jedním z nepříjemných následků může být nebezpečné zvýšení potenciálu kolejí v okolí připojení na kolejnici. Nejvíce tímto zvýšením potenciálu jsou ohrožovány součásti zabezpečovacího zařízení, jako například stykové transformátory. Nepříjemným jevem souvisejícím s tímto přepětím, jsou také elektromagnetické účinky, které se mohou projevovat ve stavědlové ústředně.

Pro omezení těchto nepříjemných vlivů musíme omezit průnik bleskového proudu do kolejových obvodů v místech svodů od bleskojistek upevněných na trakčním vedení. Toho lze dosáhnout zvětšením indukčnosti mezi růžkovou bleskojistkou a kolejovým obvodem. Jednou z možností jak tohoto dosáhnout je růžkovou bleskojistku paralelně připojit na samostatné zemnění a na svod od

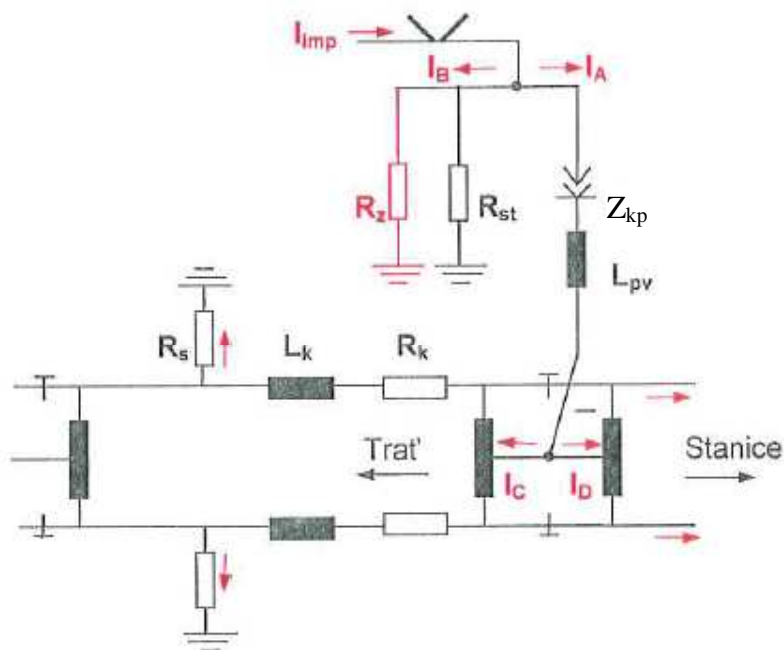
průrazky, který je připojen na střed stykového transformátoru. Možnost tohoto zapojení je znázorněna na obrázku 23.



Obr. 23: Náhradní obvod pro ukolejnění stožáru [6]

4.2.1 Obvod bez vřazené indukčnosti L_0

Obvod bez vřazené indukčnosti L_0 a s elektrickými parametry kovového stožáru se bude poněkud odlišovat od předchozího zapojení. Náhradní schéma tohoto zapojení si pak můžeme prohlédnout na obrázku 24.



Obr. 24: Úplné schéma zapojení obvodu bez indukčnosti L_0 [6]

Pro toto zapojení je nutno si ještě definovat parametry L_k a R_k , které představují parametry kolejnic. Dále se zde ještě objevuje parametr R_s , který představuje svodový odpor obou kolejnicových pásů kolejového obvodu o délce 1 km. Hodnota R_s je uvažována 10Ω a je soustředěna do poloviny tohoto úseku. Jelikož R_s je tedy soustředěno v polovině úseku, budou parametry kolejnice L_k a R_k nabývat polovičních hodnot.

Pro samotný výpočet parametrů L_k a R_k můžeme použít vzorce dle literatury [6], která uvádí, že výpočet ohmického odporu kolejnice je vlivem skin efektu dán vzorcem:

$$R_k = \frac{0,28}{o} * \sqrt{\mu * \rho * f} * 10^3 \quad (4.2.1)$$

kde R_k je již zmíněný ohmický odpor [Ω/km],

o je obvod průřezu kolejnice [cm],

μ je permeabilita oceli,

ρ je měrný odpor oceli [Ωm] a

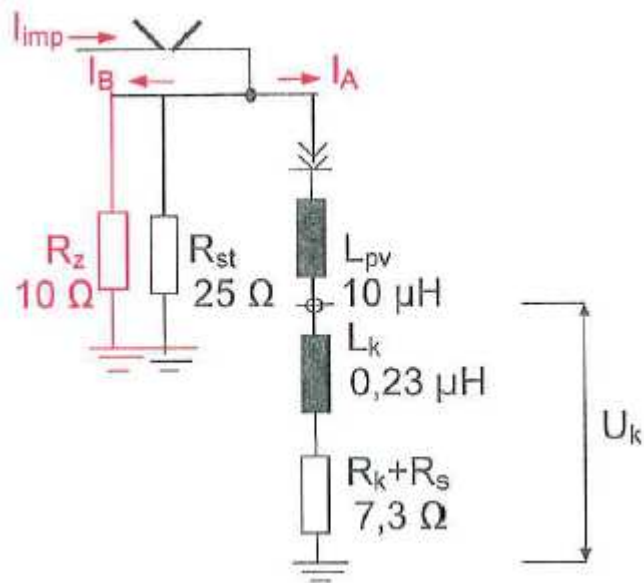
f je kmitočet proudu [Hz].

Vnitřní indukčnost kolejnice je podle stejného zdroje literatury dán vztahem:

$$L_k = \frac{R_k}{f} * 10^2 \quad (4.2.2)$$

Dále se také v tomto náhradním zapojení neprojeví reaktance obou částí vinutí stykového transformátoru, a proto můžeme zanedbat vliv ohmického odporu těchto vinutí.

Pokud vezmeme v úvahu tyto parametry a pro výpočet L_k a R_k použijeme parametry kolejnice typu R65, která má $o = 70 \text{ cm}$, $\mu = 100$, $\rho = 0,021 * 10^{-6} \Omega\text{m}$ a f uvažujeme 10^6 Hz , můžeme poté vycházet ze zjednodušeného náhradního schématu.

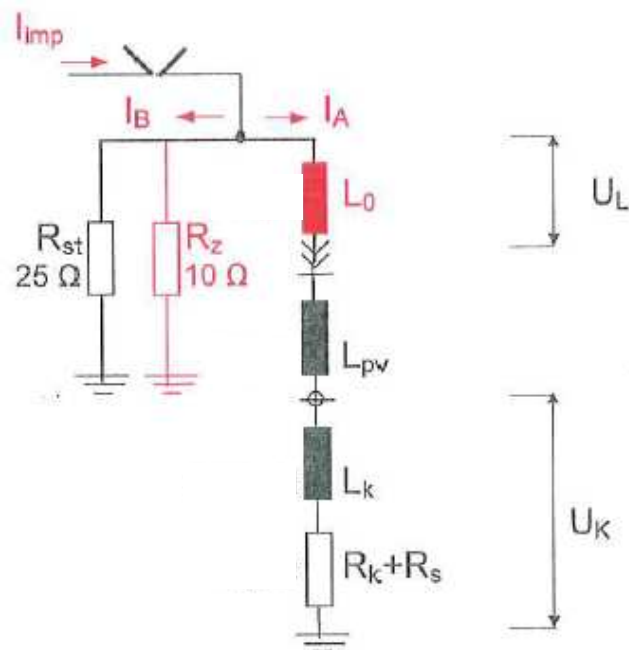


Obr. 25: Schéma zap. rúžkové bleskojistky s dodatečně přivedeným uzemněním 10Ω [6]

Uvedené hodnoty na obrázku 25 jsou poloviční, jelikož jsme nahradili obě paralelní větve kolejového obvodu jedním obvodem. Výsledný odpor R_k je stanoven pro 4 kolejové pásy.

4.2.2 Obvod s vřazenou tlumivkou do série s kolejovou průrazkou

Náhradní zapojení v tomto případě je znázorněno na obrázku 26.



Obr. 26: Schéma zapojení obvodu s tlumivkou L_0 [6]

Nevýhodou tohoto zapojení je volba velikosti tlumivky. Reálná velikost tlumivky je limitována zejména napětím na tlumivce U_L , které se na tlumivce objeví při průchodu proudem. Podle zdroje [6], který zmiňuje výsledky měření, která proběhla ve zkušebně Hakel spol. s r.o. a z výpočtů byla stanovena indukčnost v rozmezí 10 μH až 30 μH . Při vložení indukčnosti L_0 v tomto rozmezí, dosáhneme značného snížení části proudového impulsu s čelem 1 μs , které odpovídá tvaru obvyklého bleskového rázu, vstupujícího do kolejového obvodu.

Dalším problémem u tohoto obvodu jest samotné umístění tlumivky na trakční stožár. Umístění tlumivky jest sice realizovatelné, ale značně omezené konstrukčním řešením tlumivky. Jelikož při poruše na vedení dochází běžně k opakovanému zapínání do zkratu, musela by být tlumivka nadimenzována na delší vypínací časy při zkratu. Z toho vyplývá, že by musela mít větší rozměry. Navíc by se rozměry zvětšily i díky napětí na tlumivce (20 μH), které by vznikalo při úderu blesku. Toto zvětšení rozměrů by bylo pak značně nákladné. Také by musela být izolována od stožáru kolejová průrazka.

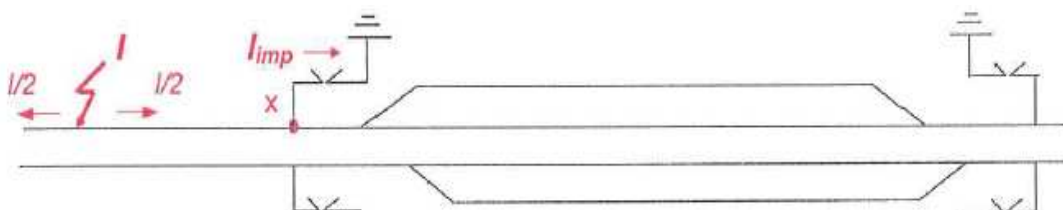
Podobného efektu, jako při vřazení tlumivky L_0 do série s kolejovou průrazkou, lze dosáhnout za pomoci prodloužení propojovacího vodiče L_{pv} . Pokud budeme předpokládat indukčnost o velikosti 1 μH na vodiči o délce 1 m a o průměru 10 mm, tak nám 30 m vodiče nahradí výše uvažovanou tlumivku. Toto řešení je pak velice jednoduché a nedojde k razantnímu navýšení nákladů, jako při použití tlumivky L_0 .

4.3 Napětí na výstroji stožáru a na jeho ukolejnění

V tomto bodě se budeme zabývat napětím na výstroji stožáru a na jeho ukolejnění. A opět budeme muset uvažovat dva případy jako v předešlém bodě. Nejprve si ale budeme muset určit velikost bleskového proudu a jeho následující rozdělení v obvodu.

Velikost bleskového proudu, podle zdroje [6], na našem území je dle statistických údajů 10 kA. Této hodnoty dosáhlo na našem území okolo 90 % blesků. Výpočty však budou prováděny pro hodnoty 10 kA a 20 kA. Dále můžeme předpokládat, že rázová vlna způsobená bleskovým výbojem má délku čela 1 μs a délku pultýlu 50 μs . Normalizovaný průběh je pak stanoven na 1,2 / 50 μs .

Pokud udeří blesk do trakčního vedení na trati, proud se rozdělí podle následujícího obrázku, který nám ukazuje, že proud rázové vlny se rozdělí na obě strany TV od místa uderu blesku rovným dílem. Zde je nutno zdůraznit, že tento dělicí poměr nezáleží na délce obou úseků TV, které sousedí s místem dopadu blesku [7].



Obr. 27: Rozdělení proudu při úderu blesku na širé trati [6]

K dalšímu rozdělení bleskového proudu na trakčním vedení takřka nedochází. Tak je tomu i v bodě „x“, jelikož impedance trakčního vedení je vzhledem k uzemnění bleskojistky příliš vysoká.

Dle výše zmíněného předpokladu projde na jednu stranu TV, kde jsou umístěny růžkové bleskojistky na trakčním stožáru, rázová vlna s poloviční vrcholovou hodnotou, než udávají výše zmíněné statistické údaje. Rázová vlna má tedy hodnotu 5 kA. Vzhledem k předpokládané délce čela rázové vlny 1 μ s, je strmost nárůstu proudu v čele vlny směrem k bleskojistce stanovena na hodnotu 5 kA/ μ s. Dále se také předpokládá lineární průběh čela rázové vlny.

Také víme, že proud procházející růžkovou bleskojistkou, označovaný jako I_{imp} , se rozděluje do dvou větví „A“ a „B“, dle náhradních schémat pro ukolejnění stožáru. Poměr rozdělení proudů je pak dán impedancí jednotlivých větví. Proudů lze poté vypočítat pomocí operátorového počtu, který bude následovně rozepsán.

4.3.1 Napětí na výstroji stožáru a na jeho ukolejnění v obvodu bez vřazené indukčnosti L_0

Z výše zmíněných parametrů můžeme pomocí operátorového počtu stanovit jednu ze základních rovnic potřebnou pro další výpočty.

$$U(p) = I_m(p) * Z(p), \quad (4.3.1)$$

kde $U(p)$ představuje operátorový obraz časového průběhu hledaného napětí $U(t)$ v oblasti čela rázové vlny. Jedná se o průběh v časovém rozmezí od 0 do 1 μ s od dopadu rázové vlny.

$I(p)$ představuje operátorový obraz dopadlé rázové vlny s vrcholovou hodnotou 5 kA a se strmostí značenou aI , která nabývá hodnoty $5 \cdot 10^9$ A/s. Lze ho také vyjádřit v idealizovaném tvaru jako

$$I_m(p) = \frac{aI}{p} \quad (4.3.2)$$

$Z(p)$ nám pak představuje v operátorovém počtu impedanci celého obvodu a lze vypočítat pomocí vztahu

$$Z(p) = \frac{R_{zst} * (R_k + p * L)}{R_k + R_{zst} + p * L} \quad (4.3.3)$$

Po dosazení do vzorce 4.3.1 za $I_m(p)$ a za $Z(p)$ dostaneme výraz

$$U(p) = \frac{aI}{p} * \frac{R_{zst} * (R_k + p * L)}{R_k + R_{zst} + p * L} \quad (4.3.4)$$

Pro zjednodušení vzorce lze sloučit některé prvky ve výrazu a to

$$R_{celk} = R_k + R_{zst} = 7,3 + 7,143 = 14,443 \quad (4.3.5)$$

U vzorce 4.3.4 provedeme zpětnou transformaci. Aby šla zpětná transformace provést, musíme použít větu o rozkladu operátorových obrazů a obraz $U(p)$ rozdělit do dvou obrazů. Když toto provedeme dostaneme podle [7] výraz

$$U(p) = aI * R_{zst} \left[\frac{R_k}{p * (p * L + R_{celk})} + \frac{L}{p * L + R_{celk}} \right] \quad (4.3.5)$$

Výraz 4.3.5 lze poté zjednodušeně napsat jako

$$U(p) = aI * R_{zst} [A(p) + B(p)] \quad (4.3.6)$$

Člen $B(p)$ lze pak podle zdroje [7] napsat

$$B(p) = \frac{1}{p - \left(-\frac{R_{celk}}{L} \right)}, \quad (4.3.7)$$

což je podle transformace obraz

$$\frac{1}{p-a}; \quad \text{kde } a = -\frac{R_{celk}}{L}$$

Zpětnou transformací členu B(p) pak podle [7] získáme člen B v závislosti na čase, který je dán výrazem

$$B(t) = \frac{L}{R_{celk}} * \left[1 - e^{\left(\frac{R_{celk}}{L} * t\right)} \right]. \quad (4.3.8)$$

Člen A(p) lze pak podle [7] rozepsat

$$A(p) = \frac{R_k}{L} * \frac{1}{p * \left[p - \left(-\frac{R_{celk}}{L}\right) \right]}, \quad (4.3.9)$$

což je podle transformace obraz

$$\frac{R_k}{L} * \frac{1}{p * (p-b)}; \quad \text{kde } b = -\frac{R_{celk}}{L}$$

Pro získání členu A(t) budeme muset použít integrování členu A(p), jelikož tento člen není přímo uveden ve slovníku pro transformaci. A(t) bude pak mít tvar

$$A(t) = \frac{R_k}{L} * \int_0^t \frac{e^{(b*t)} - 1}{b} dt = \frac{R_k}{R_{celk}} * \int_0^t 1 - e^{(b*t)} dt, \quad (4.3.10)$$

což po integraci dává dle zdroje [7] vztah

$$A(t) = \frac{R_k}{R_{celk}} * \left[t + \frac{L}{R_{celk}} * e^{\left(\frac{R_{celk}}{L} * t\right)} - \frac{L}{R_{celk}} \right], \quad (4.3.11)$$

Po dosazení za A(t) a B(t) a po několika úpravách dostaneme podle zdroje [6] výraz

$$U(t) = aI * \frac{L * R_{zst}}{R_{celk}} * \left\{ \frac{R_k}{L} * t + \frac{R_{zst}}{R_{celk}} * \left[1 - e^{\left(\frac{R_{celk}}{L} * t\right)} \right] \right\}. \quad (4.3.12)$$

Takto upraveným výrazem můžeme vyšetřovat vrcholovou hodnotu hledaného napětí. Za čas t dosadíme 1 μ s, což je čas, kdy rázová vlna dosahuje své vrcholové hodnoty. Po dosazení hodnot do vzorce 4.3.12 dostaneme výsledné napětí na stožáru, které je

$$U(1\mu s) = aI * \frac{L * R_{zst}}{R_{celk}} * \left\{ \frac{R_k}{L} * t + \frac{R_{zst}}{R_{celk}} * \left[1 - e^{\left(\frac{R_{celk}}{L} * t\right)} \right] \right\}$$

$$U(1\mu s) = 5 * 10^9 * \frac{10,23 * 10^{-6} * 7,143}{14,44} * \left\{ \frac{7,3}{10,23 * 10^{-6}} * 1 * 10^{-6} + \frac{7,143}{14,44} * \left[1 - e^{\left(-\frac{14,44}{10,23 * 10^{-6}} * 1 * 10^{-6} \right)} \right] \right\}$$

$$\underline{U(1\mu s) = 27\,513\,V}$$

Z tohoto napětí pak můžeme zjistit proudy, které tečou v jednotlivých větvích. K tomu nám poslouží následující výrazy:

$$I_B = \frac{U_{(1\mu s)}}{R_B} = \frac{U_{(1\mu s)}}{R_{zst}} \quad \text{a} \quad (4.3.13)$$

$$I_A = I_{imp} - I_B \quad (4.3.14)$$

Po dosazení hodnot do vzorců 4.3.13 a 4.3.14 dostaneme pro $I_{imp} = 5\text{ kA}$ a 10 kA výsledky, které jsou uvedeny v následující tabulce. Je také nutno ještě spočítat $U_{(1\mu s)}$ pro bleskový proud o velikosti 20 kA , kde je $a_1 = 10 * 10^9\text{ A/s}$. Vypočtená hodnota bude opět uvedena v následující tabulce.

Intenzita blesku I (kA/ μ s)	Proud procházející bleskojistkou I_{imp} (A/s)	Napětí na vrcholu stožáru $U(1\mu s)$ (V)	Proud ve větví A I_A (kA/ μ s)	Proud ve větví B I_B (kA/ μ s)	U na středu stykového transformátoru U_k (V)
10	$5 * 10^9$	27 513	1,148	3,8519	8 811,5
20	$10 * 10^9$	55 027	2,296	7,7037	17 623

Tab. 2: Vypočtené hodnoty v MATLABU dle vzorců ze zdroje [6]

Také je ještě potřeba vypočítat hodnoty pro napětí na odporu kolejí, které se spočítají dle vztahu uvedeného v [6]:

$$U_{1Rk+Rs} = (R_k + R_s) * I_{A1} = 7,3 * 1148 = 8381,4\text{V} \quad (4.3.15)$$

Hodnota pro bleskový proud o velikosti 20 kA pak bude dle vztahu 4.3.15 vypočtena následovně:

$$U_{2Rk+Rs} = (R_k + R_s) * I_{A2} = 7,3 * 2296 = 16763\text{V}$$

Pro napětí na indukčnosti kolejí a svodovém vedení, je použit vztah dle [6]

$$U_{L1} = U_{1\mu s1} - U_{1Rk+Rs} = 27\,513 - 8\,381,4 = 19\,132V \quad \text{a} \quad (4.3.16)$$

$$U_{L2} = U_{1\mu s2} - U_{2Rk+Rs} = 55\,027 - 16\,763 = 38\,264V$$

Pro rozdělení napětí na indukčnosti L, je použit vztah dle [6]

$$\frac{U_{L1}}{\mu H} = \frac{U_{L1}}{L} = \frac{19\,132}{10,23} = 1870,2 \text{ V}/\mu H \quad \text{a} \quad (4.3.17)$$

$$\frac{U_{L2}}{\mu H} = \frac{U_{L2}}{L} = \frac{38\,264}{10,23} = 3740,4 \text{ V}/\mu H$$

Pro napětí na indukčnosti kolejí U_{Lk} je použit vztah dle [6]

$$U_{Lk} = L_k * \frac{U_{L1}}{\mu H} = 0,23 * 1870,2 = 430,14V \quad \text{a} \quad (4.3.18)$$

$$U_{Lk} = L_k * \frac{U_{L2}}{\mu H} = 0,23 * 3740,4 = 860,28V$$

A pro výpočet napětí na středu stykového transformátoru je použit vztah dle [6]

$$U_k = U_{Rk+Rs} + U_{lk} \quad (4.3.19)$$

4.3.2 Napětí na výstroji stožáru a na jeho ukolejnění v obvodu s vřazenou tlumivkou do série s kolejovou průrazkou

V tomto případě je do obvodu přidána do série tlumivka L_0 , která má hodnotu $20 \mu H$. Celková indukčnost L vzroste oproti předchozímu případu na $30,23 \mu H$. Zapojení celého obvodu je pak znázorněno výše a to v kapitole 4.2.2. Výpočty jednotlivých parametrů jsou poté provedeny dle vzorců z předešlé kapitoly 4.3.1 a nejdůležitější z nich jsou uvedeny v tabulce 2. Opět jsou hodnoty počítány v Matlabu pro dvě různé hodnoty bleskového proudu o velikostech 10 kA a 20 kA.

Intenzita blesku I (kA/ μ s)	Proud procházející bleskojistkou I_{imp} (A/s)	Napětí na vrcholu stožáru $U(1\mu$ s) (V)	Proud ve větví A I_A (kA/ μ s)	Proud ve větví B I_B (kA/ μ s)	U na středu stykového transformátoru U_k (V)
10	$5 \cdot 10^9$	32 094	0,506 88	4,4931	3 916,2
20	$10 \cdot 10^9$	64 187	1,0138	8,9862	7 832,5

Tab. 3: Vypočtené hodnoty v MATLABU dle vzorců ze zdroje [6]

Kromě těchto hodnot spočítaných v tabulce 2, byly v předešlém bodě počítány ještě další parametry, jejichž hodnoty budou vypočteny v následujícím textu.

Napětí na odporu kolejí počítané dle vzorce 4.3.15 je pro bleskový proud o velikosti 10 kA:

$$U_{R_k+R_s} = 3\,700,2 \text{ V},$$

a pro bleskový proud o velikosti 20 kA:

$$U_{R_k+R_s} = 7\,400,4 \text{ V}.$$

U dalších výpočtů bude uváděna první hodnota pro bleskový proud o velikosti 10 kA a druhá hodnota pro bleskový proud o velikosti 20 kA.

Napětí na celkové indukčnosti L , počítané dle vzorce 4.3.16 bude nabývat hodnot:

$$U_{L(10kA)} = 28\,394 \text{ V} \text{ a } U_{L(20kA)} = 56\,787 \text{ V}.$$

Rozdělení napětí na celkové indukčnosti L , počítané dle vzorce 4.3.17 bude nabývat hodnot:

$$U_{L(10kA)}/\mu\text{H} = 939,25 \text{ V}/\mu\text{H} \text{ a } U_{L(20kA)}/\mu\text{H} = 1\,878,5 \text{ V}/\mu\text{H}.$$

Napětí na indukčnosti kolejí U_{L_k} , počítané dle vzorce 4.3.18 bude nabývat hodnot:

$$U_{L_k(10kA)} = 216,0274 \text{ V} \text{ a } U_{L_k(20kA)} = 432,0548 \text{ V}.$$

Dále se zde oproti předešlému bodu zavádí výpočet napětí na ochranné indukčnosti L_0 , který je dán vtahem:

$$U_{L0(10kA)} = L_0 * \frac{U_L}{\mu H} = 20 * 10^{-6} * 939,25 = 18\,785 \text{ V} \quad \text{a} \quad (4.3.20)$$

$$U_{L0(20kA)} = L_0 * \frac{U_L}{\mu H} = 20 * 10^{-6} * 1878,5 = 37\,570 \text{ V} \quad .$$

Závěr

V prvním bodě jsou popsány základní pojmy z čeho se skládá TV a co vše může obsahovat. Dále jsou zde uvedeny základní materiály a průřezy vodičů používaných v síti 3 kV DC. Dále se zde zabývám jak se toto trakční vedení bude chovat při rázových vlnách a jaký bude mít toto vedení charakter. V neposlední řadě je zde popsáno, z čeho se skládá měnírna a jak se chová při různých schématech. Dále je zde ještě popsáno, jak bude trakční měnírna působit směrem do sítě dodavatele elektrické energie a jak se bude chovat vzhledem k trakčnímu vedení.

V druhém bodě této práce jsme se seznámili s průběhem rázové vlny, která byla normovaná podle IEC. Dále zde byly definovány dva základní pojmy, a to čelo vlny a půltýl vlny, z kterých se vychází při simulacích. Při modelování rázové vlny jsme vyzkoušeli pomocí SW PSpice dva nezávislé zdroje napětí. U těchto zdrojů se lépe pro využití v simulacích jevil nezávislý zdroj napětí typu EXP. Tento zdroj má lepší průběhy charakteristik, které více odpovídají reálnému průběhu.

Ve třetím bodě, který se zabývá místy odrazu rázové vlny na vedení, jsou popsány základní body, kde k těmto odrazům v praxi dochází. Je zde popsáno jak se vlna odrazí, když vedení bude zkratováno, nebo rozpojeno. Dále se zde popisuje jak se odrazí vlna v bodě, kde se mění vlnová impedance a v bodě kde je k vedení připojeno elektrické hnací vozidlo. Dále je zde také zmíněn jeden z možných způsobů jak sledovat průběh rázové vlny pomocí grafického zpracování.

Ve čtvrtém bodě, který se zabýval poměry po úderu blesku do stožáru TV, se zkoumalo zapojení s ochrannou tlumivkou L_0 a zapojení bez ochranné tlumivky L_0 . Bylo zjištěno pomocí výpočtů a simulace v SW PSpice, že v zapojení bez ochranné tlumivky L_0 je menší napětí na vrcholu stožáru, ale zároveň je větší napětí na středu stykového transformátoru, které může ovlivňovat KO. V zapojení s ochrannou tlumivkou L_0 tomu bylo právě naopak. Dále bylo zjištěno, že větší proudy procházely větví B, kterou tvořily pouze odpory R_{st} a R_z a byly přímo uzemněny. Proudů ve větví A byly pak o mnoho menší než ve větví B. V zapojení s ochrannou tlumivkou L_0 se zjišťované hodnoty snížily o více než 50% oproti hodnotám při zapojení bez ochranné tlumivky L_0 .

Seznam použité literatury

- [1] Hlava K.: Elektromagnetická kompatibilita drážních zařízení, skriptum UPa KEEZ 2004
- [2] Hlava K.: Napájení elektrických drah, učební pomůcka UPa DFJP KEEZ 2006
- [3] Z historie elektrizace železnic, příloha dvojmagazínu grand expres, únor 2008
- [4] Krčma T., Satori M, Výkruta V.: Koordinace ochrany trakčního vedení a zařízení napájených z TV před přepětím a zkratem – 1. část, SborníkVTK Prostějov 2008
- [5] Hajzl J.: Omezení šíření přepětí v napájecí soustavě 25 kV, 50 Hz, UPa DFJP KEEZ 2006
- [6] AŽD: Ochrana vnějších prvků zabezpečovacího zařízení proti účinkům blesku, Praha, 2008
- [7] Hlava K.: Analýza poměrů při příchodu rázové vlny na TV – zpráva pro EŽ, srpen 2008
- [8] Hlava K.: Doplnky ke skriptu Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení, UPa 2004
- [9] VÚŽ: Průzkum šíření přepětiových vln v trakčním vedení, Praha 1972
- [10] UPa DFJP KEEZ: Přednáška z energetiky kolejové dopravy - Zkratové Poměry
- [11] Bewley L. V.: Traveling waves on transmission systéme, 2nd Edition, GEC, NEW YORK, USA, 1951, 621.31921

Seznam obrázků

Obr. 1: Trolejový drát [2].....	11
Obr. 2: Náhradní zapojení homogenního vedení	15
Obr. 3: Frekvenční závislost měrné indukčnosti trakčního obvodu [1]	16
Obr. 4: Šíření rázové vlny v trakčním obvodu [1].....	17
Obr. 5: Schéma trakčního usměrňovače s nulovou tlumivkou.....	23
Obr. 6: Celkový primární proud dvanáctipulzního usměrňovače [1].....	24
Obr. 7: Schéma trakčního usměrňovače bez nulové tlumivky.....	24
Obr. 8: Primární proud Y sekce pro dvanáctipulzní usměrňovač bez nulové tlumivky [1].....	25
Obr. 9: Primární proud D sekce pro dvanáctipulzní usměrňovač bez nulové tlumivky [1].....	25
Obr. 10: Celkový primární proud dvanáctipulzního usměrňovače bez nulové tlumivky [1].....	26
Obr. 11: Spektrum primární proud dvanáctipulzního usměrňovače [1]	27
Obr. 12: Příklad rázové vlny s vrcholovou hodnotou 5 kA [8].....	32
Obr. 14: Generátor rázové vlny [8]	34
Obr. 15: Záznamové zařízení pro generátor rázové vlny [8]	35
Obr. 16: Odraz rázové vlny na dlouhém vedení při zkratu [9]	38
Obr. 17: Odraz rázové vlny na dlouhém vedení při otevřeném konci [9].....	39
Obr. 18: Odraz mřížkou [11]	42
Obr. 19: Charakter vedení z DC zdroje [11]	44
Obr. 20: Porovnání rázových vln IEC a vlny s půltýlem 10 μ s [8].....	46
Obr. 21: Šíření rázové vlny v úseku Stránčice – Čerčany [8]	46
Obr. 22: Uspořádání zařízení na stožáru TV – a) s tlumivkou L_0 , b) bez tlumivky L_0 [6]	48
Obr. 23: Náhradní obvod pro ukolejnění stožáru [6].....	50
Obr. 24: Úplné schéma zapojení obvodu bez indukčnosti L_0 [6]	50
Obr. 25: Schéma zap. růžkové bleskojistky s dodatečně přivedeným uzemněním 10 Ω [6] .	52
Obr. 26: Schéma zapojení obvodu s tlumivkou L_0 [6].....	52
Obr. 27: Rozdělení proudu při úderu blesku na širé trati [6].....	54

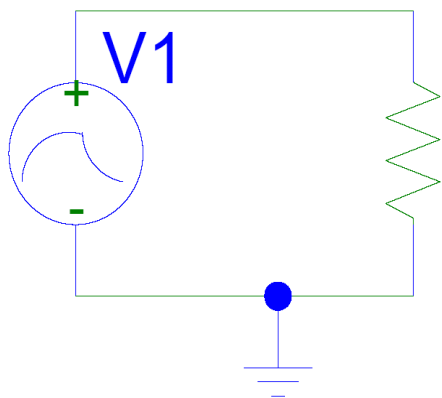
Seznam tabulek

Tab. 1: Hodnoty vlny dle obrázku 19 [11].....	45
Tab. 2: Vypočtené hodnoty v MATLABU dle vzorců ze zdroje [6]	57
Tab. 3: Vypočtené hodnoty v MATLABU dle vzorců ze zdroje [6].....	59

Příloha 1:

Modelování rázové vlny pomocí nezávislého zdroje napětí typu EXP

Parametry použitých prvků:



R1
1

R1=1 - odpor na kterém proběhla simulace

V1=0 - počáteční napětí [V]

V2=1 - špičkové napětí [V]

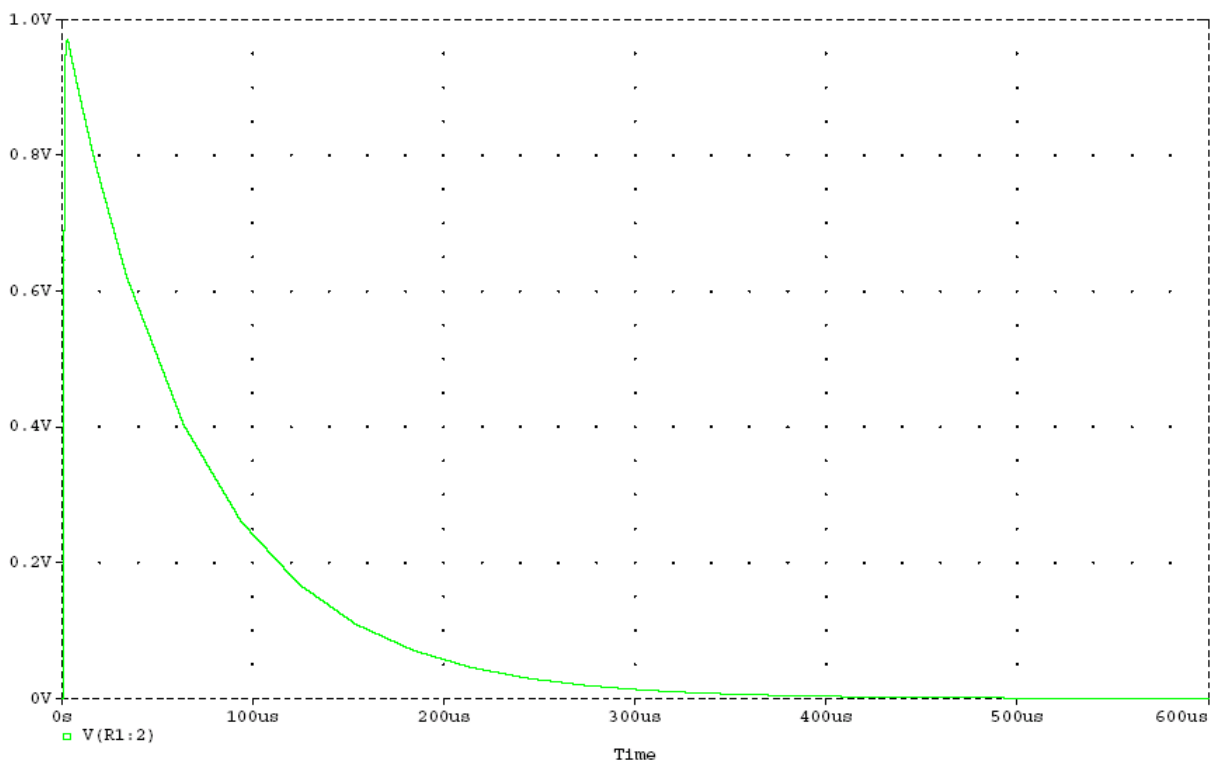
td1=1 μ - počáteční doba s hodnotou V1[s]

td2=1,2 μ - doba ukončení náběhu [s]

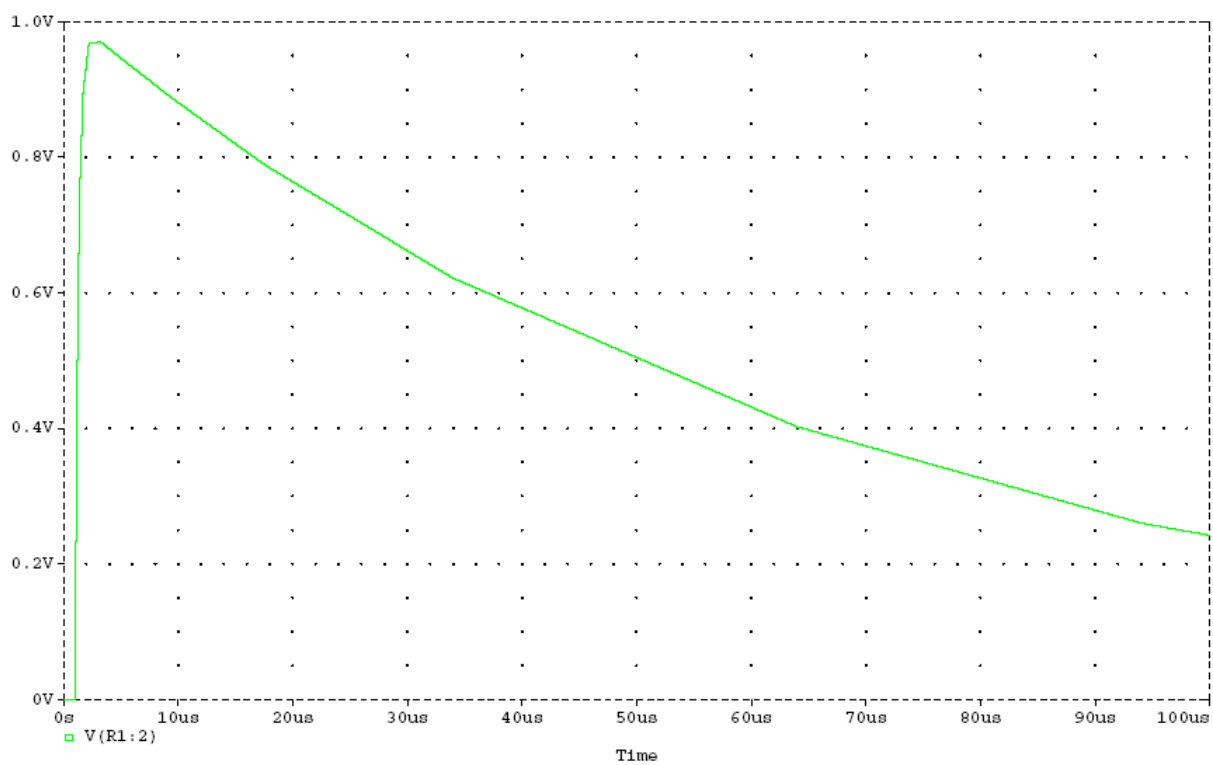
tc1=0,3 μ - časová konstanta náběhu [s]

t c2=0,69 μ - časová konstanta sestupu [s]

Průběh rázové vlny



Průběh rázové vlny – detail čela a pŕůtýlu

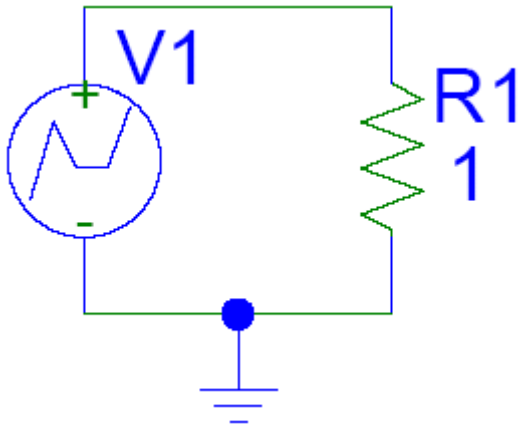


Příloha 2:

Modelování rázové vlny pomocí nezávislého zdroje napětí typu PWL

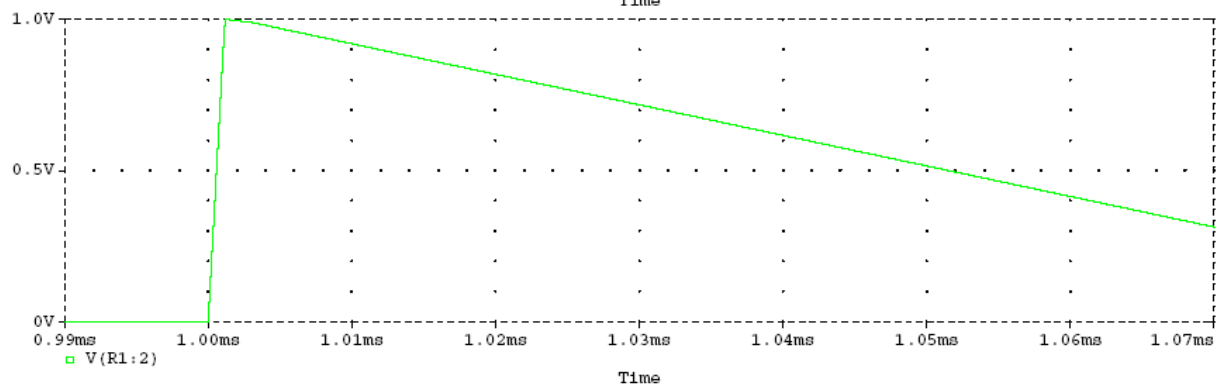
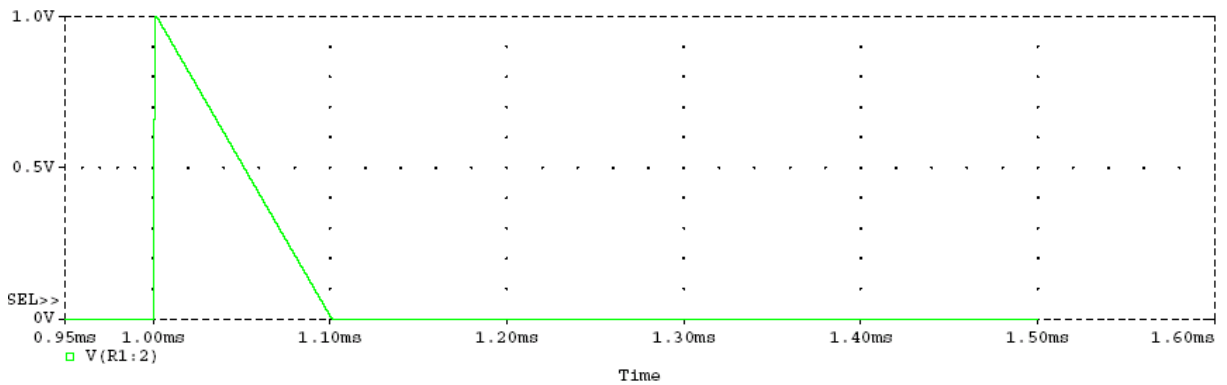
Parametry použitých prvků:

R1=1 - odpor na kterém proběhla simulace



	V [V]	T[μ s]
1	0	1000,00
2	0,95	1001,10
3	0,98	1001,15
4	1	1001,20
5	0,99	1003,00
6	0	1101,00

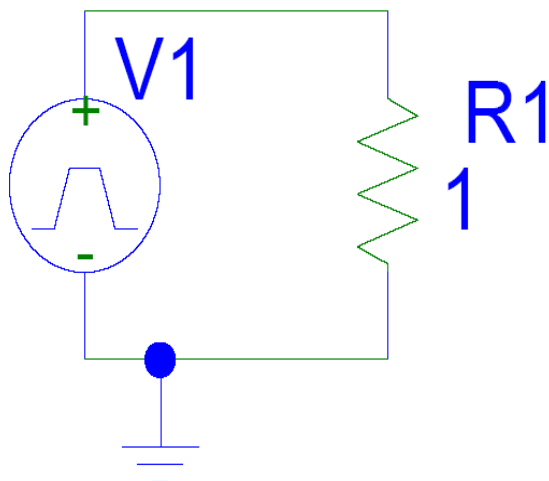
Průběh rázové vlny a detail čela a půltýlu (spodní obrázek)



Příloha 3:

Modelování rázové vlny pomocí nezávislého zdroje napětí typu PULSE

Parametry použitých prvků:



R1=1 - odpor na kterém proběhla simulace

V1=0 - počáteční proud [V]

V2=5k - špičkový proud [V]

TD=0s - počáteční doba s hodnotou I1

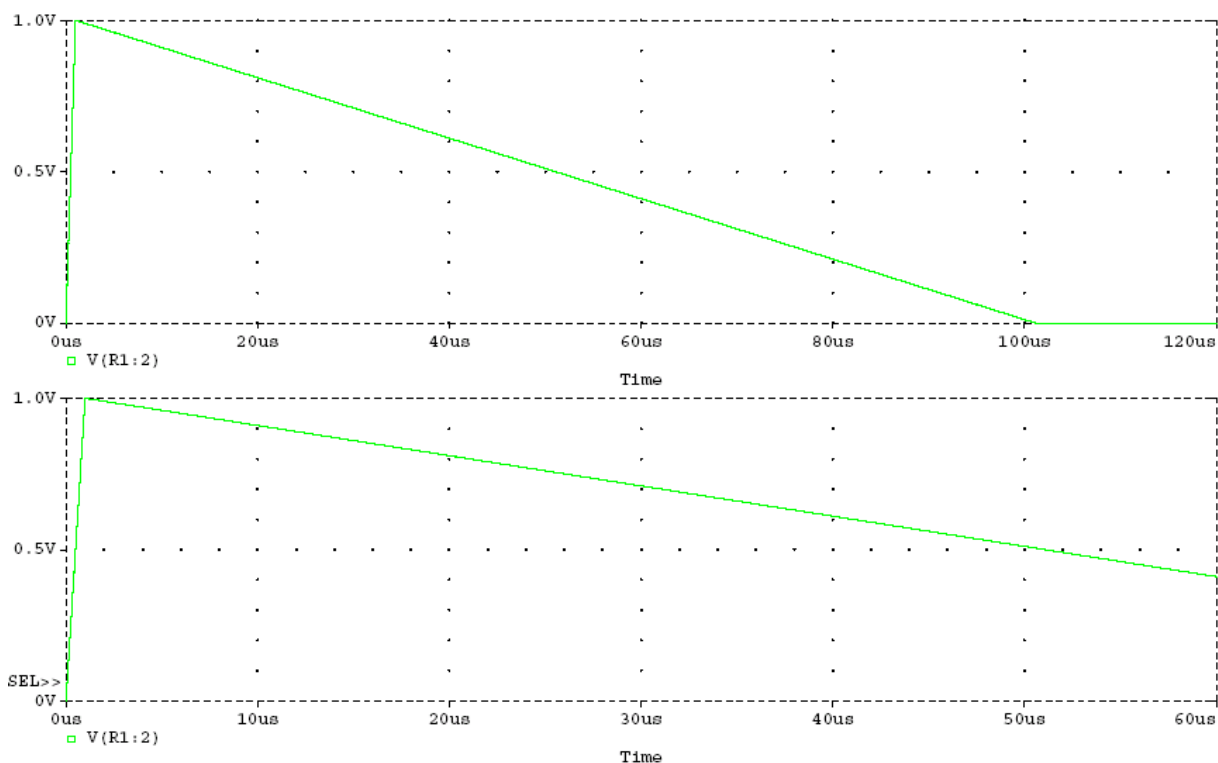
TR=1 μ s - doba náběžné hrany

TF=100 μ s - doba sestupné hrany

PW=0,1 μ s - šířka pulsu s hodnotou I2

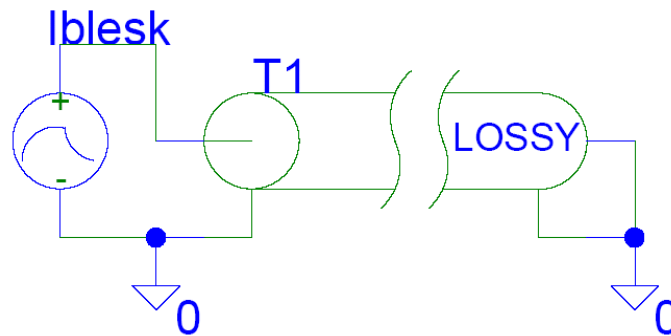
PER=1s - perioda

Průběh rázové vlny a detail čela a pŕltýlu (spodní obrázek)



Příloha 4:

Modelování rázové vlny na vedení, které je na konci zkratované



Parametry použitých prvků:

Zdroj I blesk:

$I_1=0$ - počáteční proud [A]

$I_2=5k$ - špičkový proud [A]

$td_1=1\mu$ - počáteční doba s hodnotou I_1 [s]

$td_2=1,2\mu$ - doba ukončení náběhu [s]

$tc_1=0,3\mu$ - časová konstanta náběhu [s]

$tc_2=0,69\mu$ - časová konstanta sestupu [s]

Dlouhé vedení T1:

$LEN = 20$ – délka vedení [km]

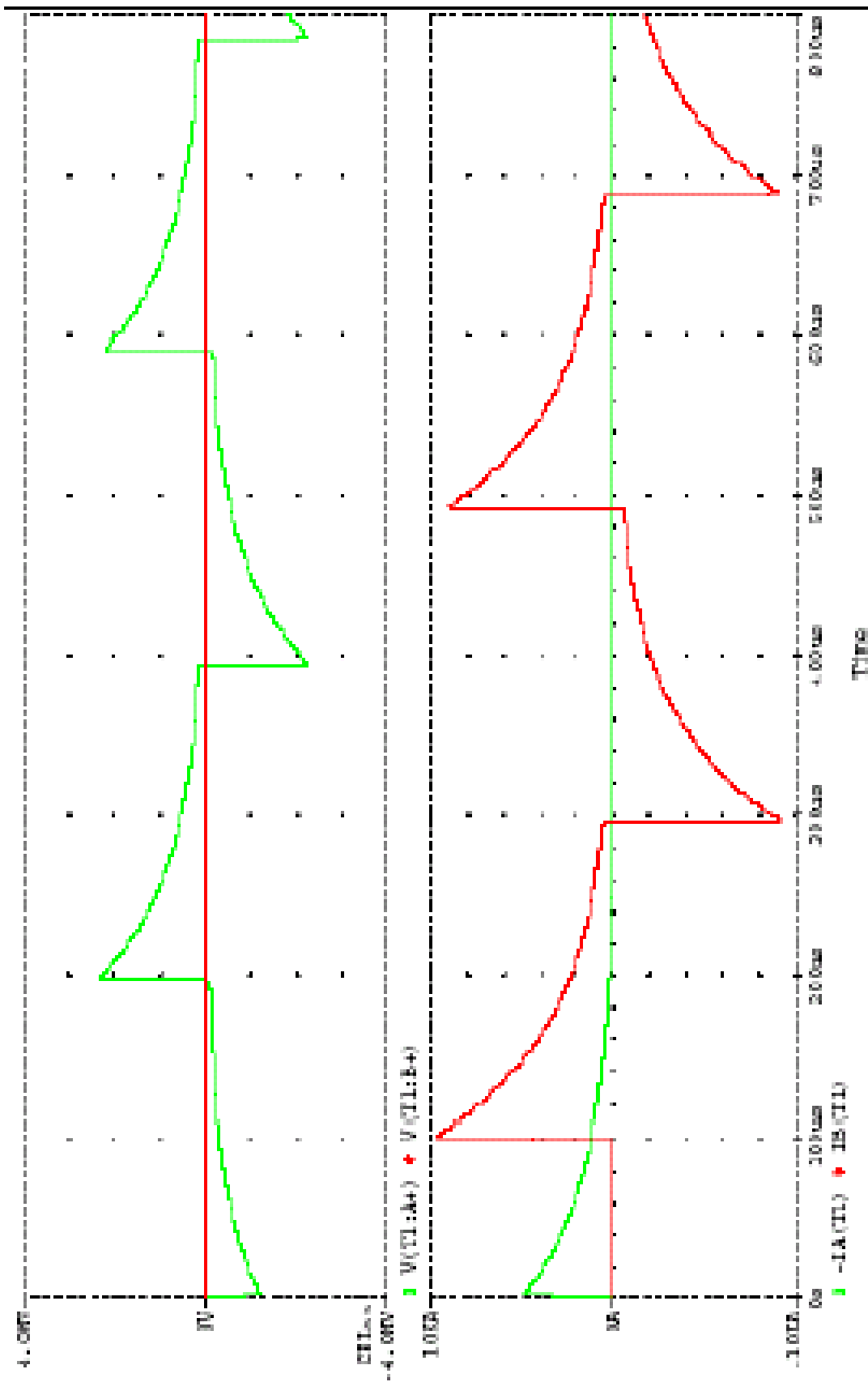
$R = 0.0765$ – odpor vedení [Ω]

$L = 1.2m$ – indukčnost vedení [H]

$G = 0$ – svod vedení [S]

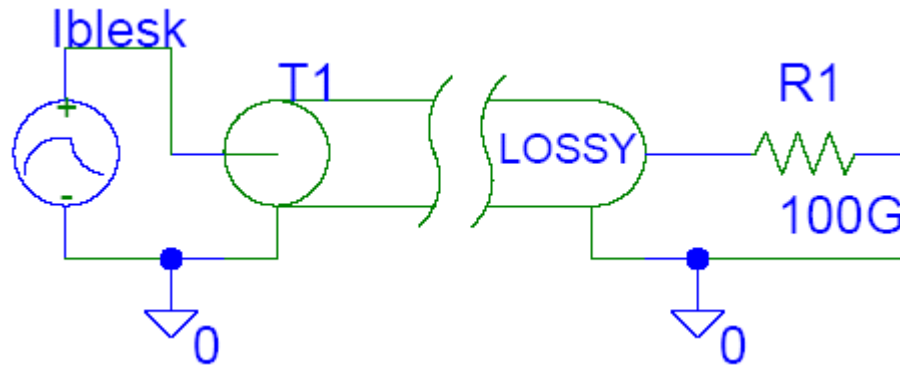
$C = 20n$ – kapacita vedení [F]

Jak je patrné z následujícího grafu, dochází k odrazu napěťové vlny s hodnotou -1 , což má za následek vyrušení působení vln. Proudová vlna se pak odráží se znaménkem $+1$, což vede k nárůstu hodnoty proudu na dvojnásobnou hodnotu



Příloha 5:

Modelování rázové vlny na vedení, které je na konci rozpojené



Parametry použitých prvků:

Zdroj Iblesk:

$I1=0$ - počáteční proud [A]

$I2=5k$ - špičkový proud [A]

$td1=1\mu$ - počáteční doba s hodnotou $I1$ [s]

$td2=1,2\mu$ - doba ukončení náběhu [s]

$tc1=0,3\mu$ - časová konstanta náběhu [s]

$tc2=0,69\mu$ - časová konstanta sestupu [s]

Dlouhé vedení T1:

$LEN = 20$ – délka vedení [km]

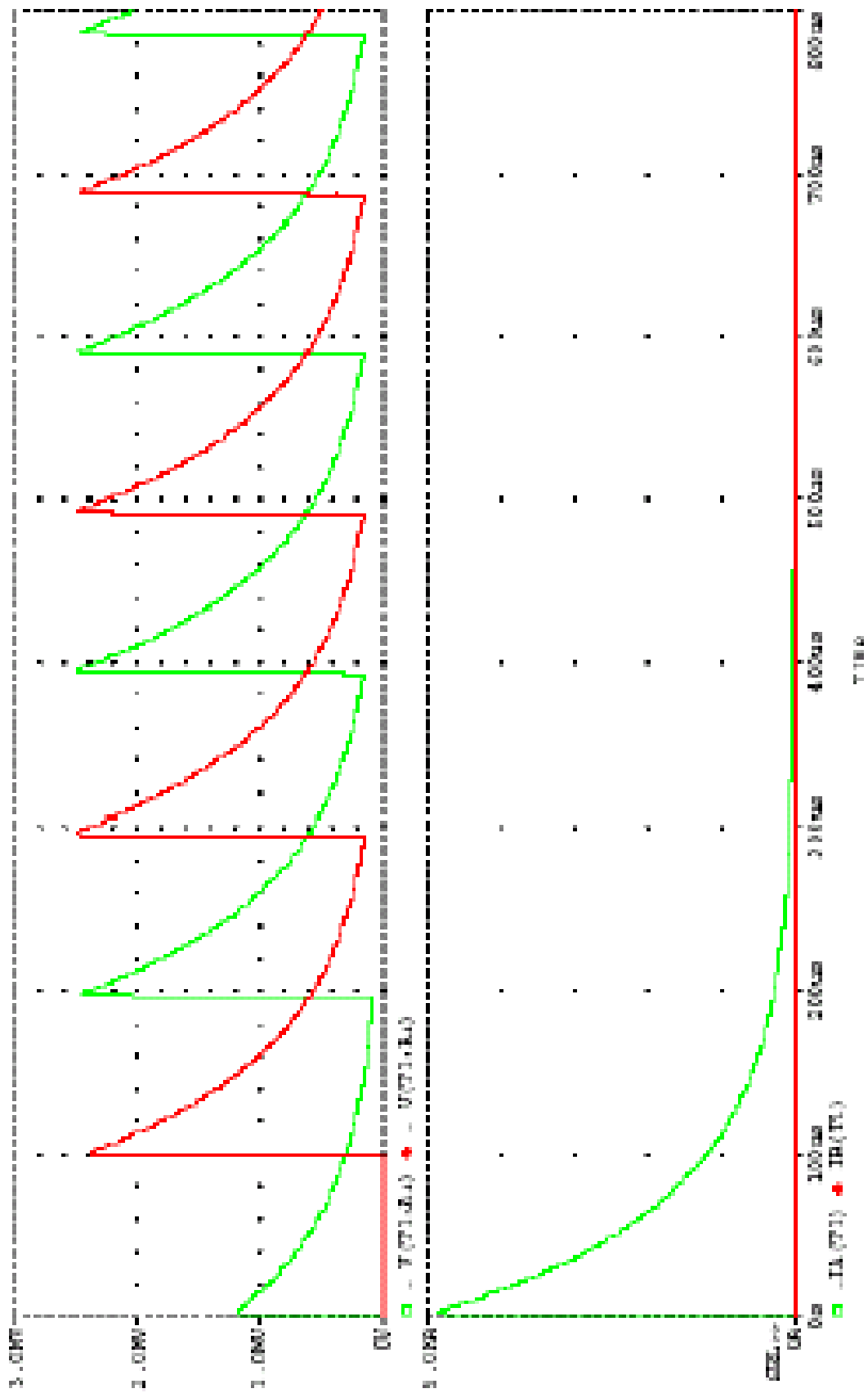
$R = 0.0765$ – odpor vedení [Ω]

$L = 1.2m$ – indukčnost vedení [H]

$G = 0$ – svod vedení [S]

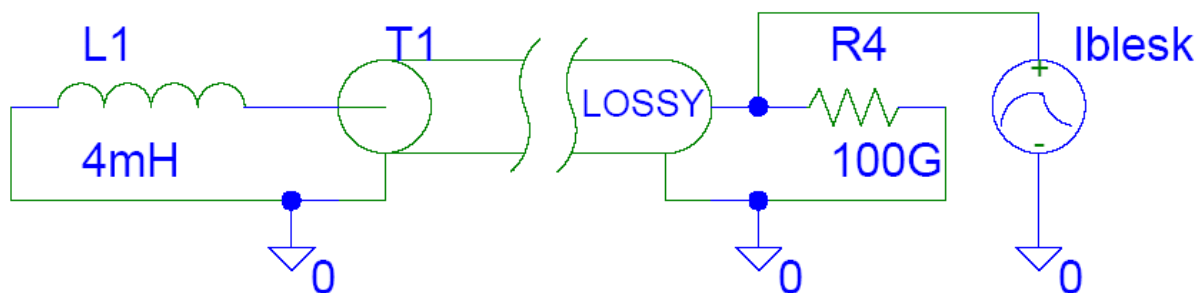
$C = 20n$ – kapacita vedení [F]

Jak je patrné z následujícího grafu, dochází k odrazu napěťové vlny s hodnotou +1, což vede k nárůstu napětí na dvojnásobnou hodnotu. Proudová vlna se pak odráží se znaménkem -1, což má za následek vyrušení působení vln. Odpor $R1$ představuje rozpojené vedení.



Příloha 6:

Modelování rázové vlny na rozpojeném vedení s vřazenou tlumivkou 4mH, která představuje indukčnost měřírny



Parametry použitých prvků:

Zdroj I blesk:

I1=0 - počáteční proud [A]

I2=5k - špičkový proud [A]

td1=1 μ - počáteční doba s hodnotou I1 [s]

td2=1,2 μ - doba ukončení náběhu [s]

tc1=0,3 μ - časová konstanta náběhu [s]

tc2=0,69 μ - časová konstanta sestupu [s]

Dlouhé vedení T1:

LEN = 20 – délka vedení [km]

R = 0.0765 – odpor vedení [Ω]

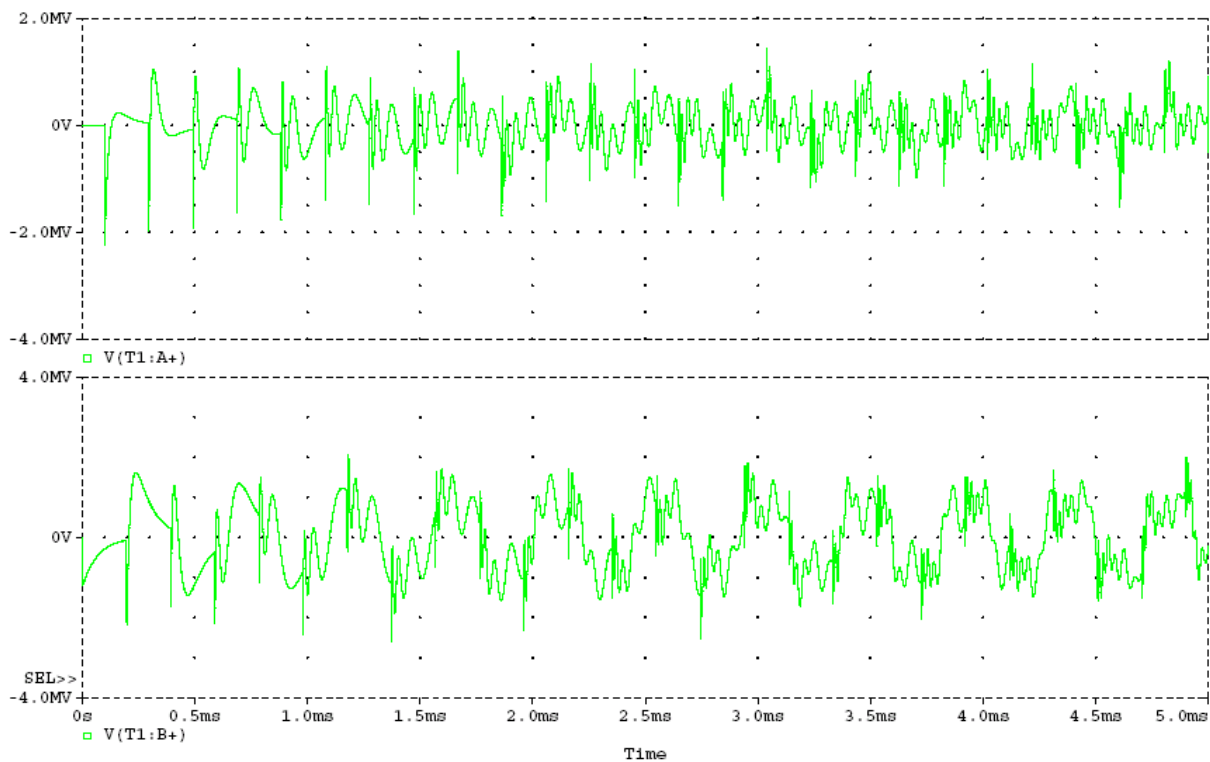
L = 1.2m – indukčnost vedení [H]

G = 0 – svod vedení [S]

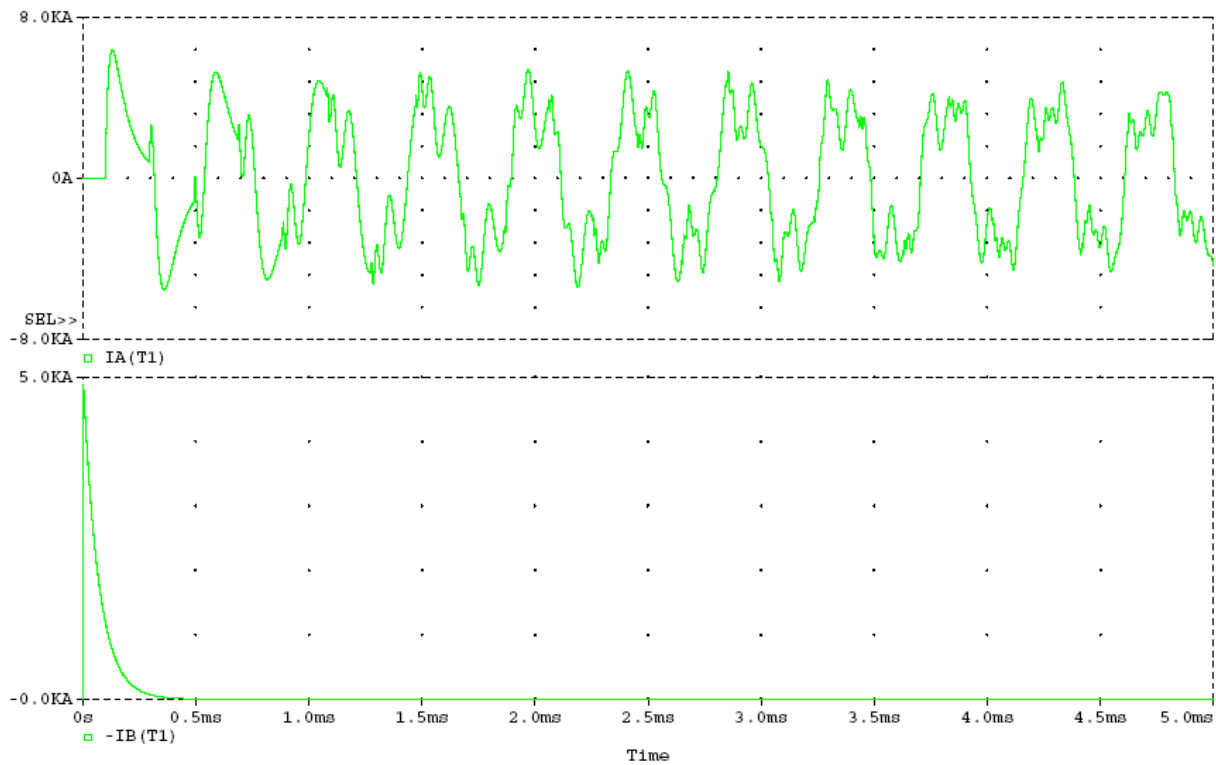
C = 20n – kapacita vedení [F]

Jak je patrné z grafů, slouží 4 mH tlumivka jako ochranný prvek měřírny. Tlumivka nepouští tak velké proudy zpět do měřírny. Hodnota proudu je v simulaci omezena na 6,4 kA.

Průběh napětí na vedení

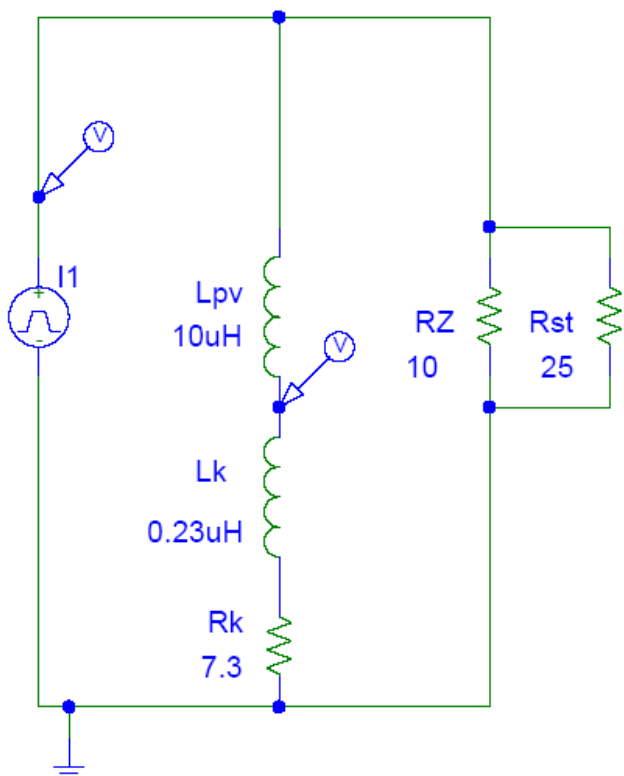


Průběh proudů na vedení



Příloha 7:

Náhradní schéma pro ukolejnění stožáru bez vřazené tlumivky L0 a simulace pomocí SW PSpice



Parametry použitých prvků:

I1:

I1=0 - počáteční proud [A]

I2=5k - špičkový proud [A]

TD=0s - počáteční doba s hodnotou I1

TR=1 μ s - doba náběžné hrany

TF=100 μ s - doba sestupné hrany

PW=0,1 μ s - šířka pulsu s hodnotou I2

PER=1s - perioda

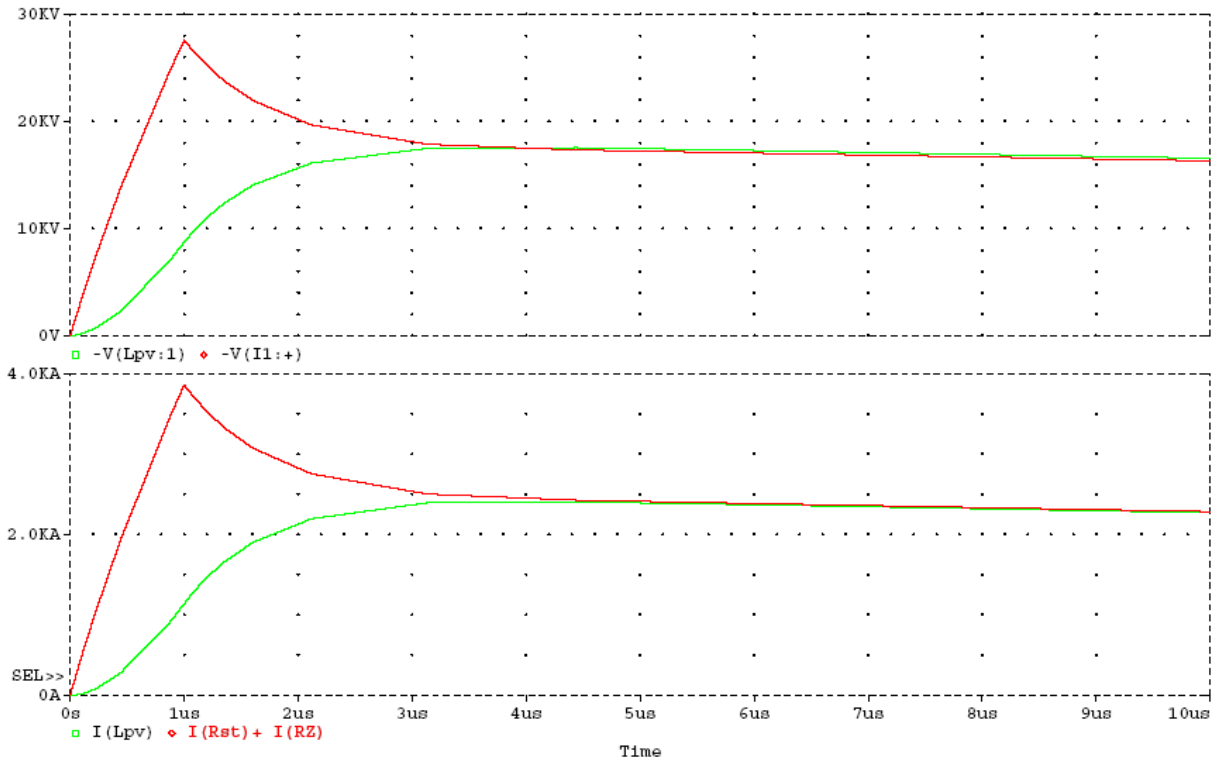
Rz = 10 Ω ; Rst = 25 Ω ; Rk = 7,3 Ω

Lpv =10 μ H; Lk = 0.23 μ H

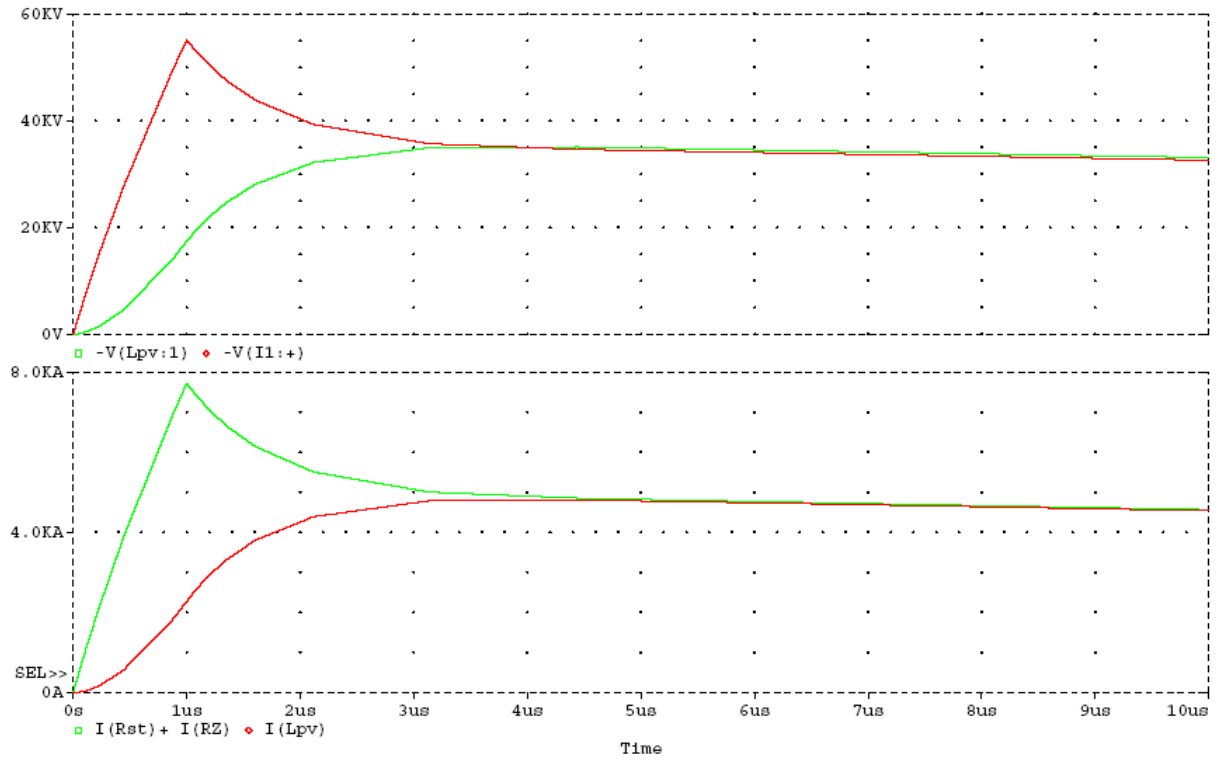
Hodnoty zjištěné pomocí simulace v SW PSpice

Intenzita blesku I (kA/ μ s)	Proud procházející bleskojistkou Iimp (A/s)	Napětí na vrcholu stožáru U(1 μ s) (V)	Proud ve větví A IA (kA/ μ s)	Proud ve větví B IB (kA/ μ s)	U na středu stykového transformátoru U _k (V)
10	5*10 ⁹	27 584	1,1382	3,8618	8 742,5
20	10*10 ⁹	55 168	2,2765	7,7235	17 485

Výsledné grafy napětí a proudů pro bleskový proud 10kA

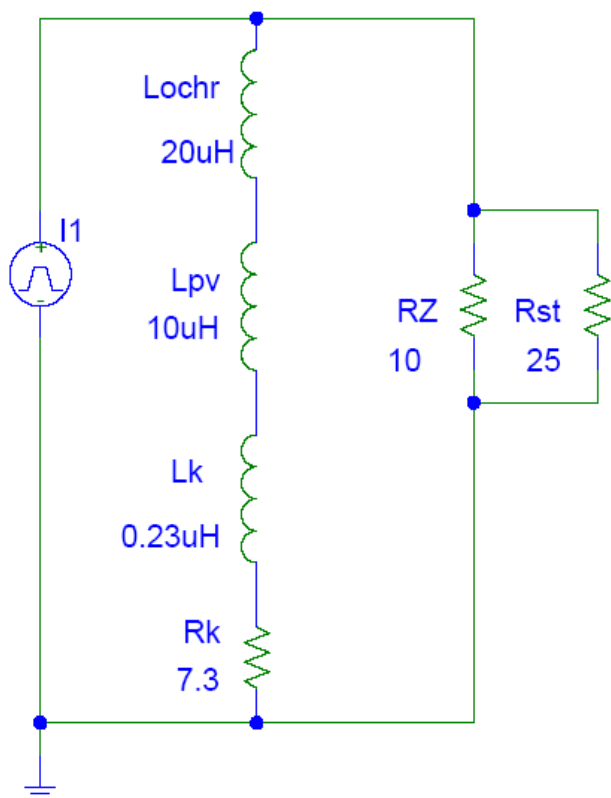


Výsledné grafy napětí a proudů pro bleskový proud 20kA



Příloha 8:

Náhradní schéma pro ukolejnění stožáru s vřazenou tlumivkou L0 a simulace pomocí SW PSpice



Parametry použitých prvků:

I1:

I1=0 - počáteční proud [A]

I2=5k - špičkový proud [A]

TD=0s - počáteční doba s hodnotou I1

TR=1μs - doba náběžné hrany

TF=100μs - doba sestupné hrany

PW=0,1μs - šířka pulsu s hodnotou I2

PER=1s - perioda

Rz = 10 Ω; Rst = 25Ω; Rk = 7,3 Ω

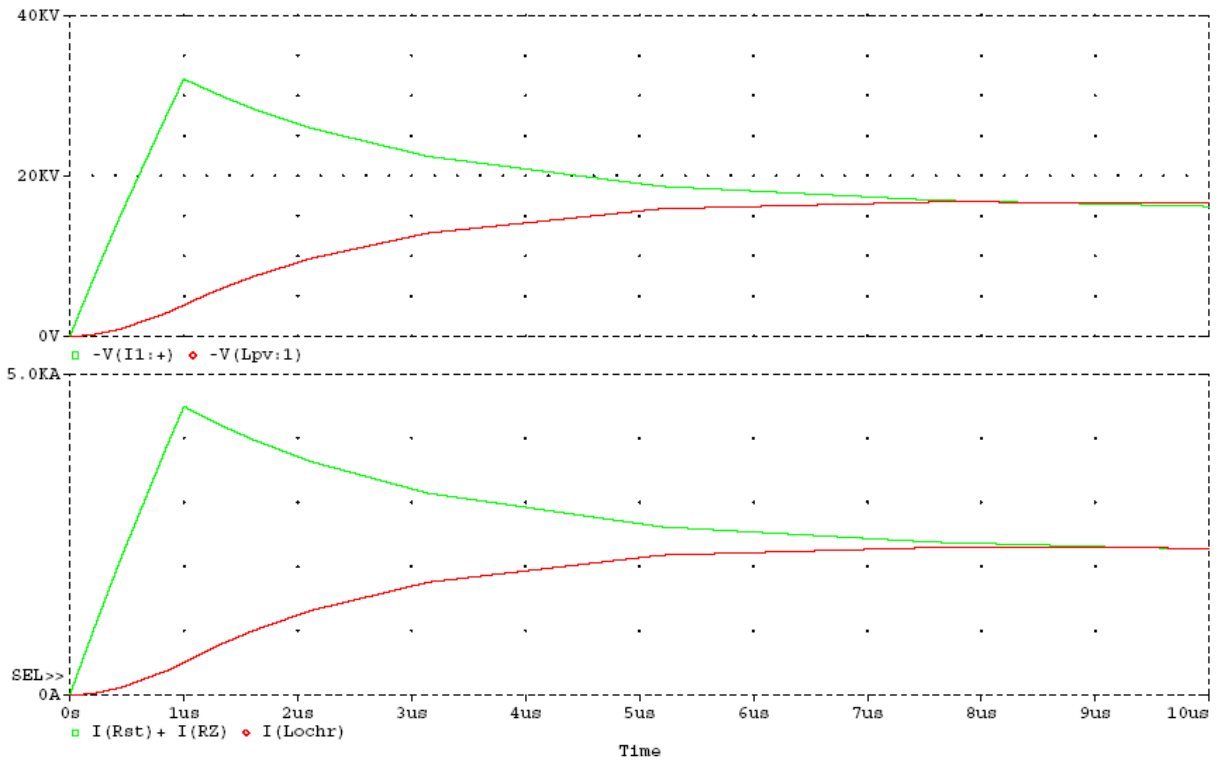
Lpv =10 μH; Lk = 0.23 μH

Lochr = L₀ = 20 μH

Hodnoty zjištěné pomocí simulace v SW PSpice

Intenzita blesku I (kA/μs)	Proud procházející bleskojistkou I _{imp} (A/s)	Napětí na vrcholu stožáru U(1μs) (V)	Proud ve větví A I _A (kA/μs)	Proud ve větví B I _B (kA/μs)	U na středu stykového transformátoru U _k (V)
10	5*10 ⁹	32 113	0,504 162	4,4958	3 896,7
20	10*10 ⁹	64 226	1,0083	8,9917	7 793,4

Výsledné grafy napětí a proudů pro bleskový proud 10kA



Výsledné grafy napětí a proudů pro bleskový proud 20kA

