



# **Ochranný systém elektronických zařízení proti přepětí na železnici**

## **The protection system of electronic equipment against surges on rail**

Diplomová práce

**Bc. Jan Sobota**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Verzich, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
katedra elektroenergetiky

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jan Sobota**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Ochranný systém elektronických zařízení proti přepětí na železnici**

Pokyny pro vypracování:


1. Obecné účinky blesků na elektronická zařízení.
2. Specifika železničních elektronických zabezpečovacích zařízení z hlediska jejich činnosti a optimální ochrany proti přepětím.
3. Současný stav ochrany elektronických stavědel a přejezdů proti účinkům blesků.
4. Výpočet podmínek činnosti uzemňovacího vedení při ochraně stavědel před účinky blesků (dodržení dotykových napětí při zkratu podle ČSN EN 50122-1 ed.2).
5. Porovnání výsledků výpočtu s měřením na modelu.
6. Vyhodnocení a závěrečná doporučení.

Seznam odborné literatury:

- [1] Verzich, V.: Koexistence trakčního obvodu a systému elektronického stavědla na elektrizovaných tratích SŽDC, Reportér AŽD Praha, 2013.
- [2] Verzich, V.: Ochrana železničních elektrizovaných stavědel a přejezdových zařízení před účinky blesku, Reportér AŽD Praha, 2007.
- [3] Verzich, V.: Spolehlivost k vyšší bezpečnosti železniční dopravy, Reportér AŽD Praha 3/2013, 2007.

Vedoucí: Ing. Vladimír Verzich, PhD.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

  
prof. Ing. Josef Tlustý CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 12. 2. 2014

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 12. května 2014

Podpis:.....

## **Poděkování**

Mé největší poděkování patří vedoucímu této práce panu Ing. Vladimíru Verzichovi, Ph.D. za pomoc při zpracovávání diplomové práce a mnoho podnětných rad. Především děkuji za pomoc s pochopením problematiky výpočtů a jejich zpracování. Dále děkuji panu Doc. Ing. Vladislavu Kvasničkovi, CSc. za pomoc při úpravách a konzultacích práce.

# Anotace

Tato diplomová práce popisuje ochranný systém elektronických zařízení proti přepětí na železnici. V první části jsou zde popsány různé účinky blesku na elektronická zařízení. Dále jsou zde uvedena specifika železničních elektronických zabezpečovacích zařízení z hlediska jejich činnosti a optimální ochrany proti přepětím. Je zde rovněž uveden současný stav ochrany elektronických stavědel a přejezdů proti účinkům blesků. Následně je proveden výpočet podmínek činnosti uzemňovacího vedení při ochraně elektronických zařízení před účinky blesků. Pro výpočet napětí a proudů na branách je vytvořen model v programu Wolfram Mathematica, pro různé vstupní parametry. Nakonec je zde závěrečné zhodnocení dané problematiky.

# Summary

This thesis describes the security system of electronic equipment against overvoltage on the rail. The first part describes various effects of lightning on electronic devices. Furthermore, there are specifications of railway electronic security devices in terms of action and optional protection against overvoltage. Next, the current state of protection of electronic interlocking and crossing against lightning effects is described and a model in Wolfram Mathematica program is created to calculate the voltage and current on gates all that for various input parameters. Finally, there is the final assessment of the issue.

# Obsah

1.	Úvod.....	10
2.	Obecné účinky blesků na elektronická zařízení.....	12
2.1.	Tepelné účinky.....	14
2.2.	Galvanické účinky .....	15
2.3.	Elektromagnetické účinky .....	17
2.4.	Elektrodynamické účinky .....	20
2.5.	Elektrochemické účinky.....	22
2.6.	Akustické účinky .....	22
2.7.	Světelné účinky .....	22
3.	Specifika železničních elektronických zabezpečovacích zařízení z hlediska jejich činnosti a optimální ochrany proti přepětím .....	23
3.1.	Základní podmínky účinné ochrany elektronického zabezpečovacího zařízení. 23	
3.2.	Nebezpečné stavy trakčních soustav ovlivňující činnosti elektronických zabezpečovacích zařízení .....	25
3.2.1.	Účinky trakční soustavy DC 3 kV: .....	25
3.2.2.	Účinky trakční soustavy AC 25 kV 50 Hz.....	25
3.2.3.	Zkratové proudy v soustavě DC 3 kV.....	27
3.2.4.	Zkratové proudy v soustavě AC 25 kV 50 Hz.....	28
4.	Současný stav ochrany elektronických stavědel a přejezdů proti účinkům blesků .....	30
4.1.	Možnosti zlepšení současného stavu .....	34
4.1.1.	Úprava svodů odbleskojistek .....	34
4.1.2.	Ukolejňovací vedení .....	37
5.	Výpočet podmínek činnosti uzemňovacího vedení při ochraně stavědel před účinky blesků .....	39
5.1.	Ukolejňovací vedení na jednom konci připojené na kolejový obvod.....	39
5.1.1.	Trakční soustava DC.....	40

5.1.2.	Trakční soustava AC .....	45
5.2.	Ukolejňovací vedení připojené na kolejový obvod uprostřed stanice .....	45
5.2.1.	Trakční soustava DC .....	46
5.2.2.	Trakční soustava AC .....	51
5.3.	Dotykové napětí .....	51
5.3.1.	Ochrana proti nebezpečným dotykovým napětím .....	51
5.3.2.	Rozložení povrchového potenciálu .....	54
5.3.3.	Výpočet dotykového napětí .....	56
6.	Porovnání výsledků výpočtu s měřením na modelu .....	58
7.	Vyhodnocení a závěrečná doporučení .....	62
8.	Literatura .....	63
9.	Přílohy .....	64
	Seznam příloh .....	64

# Seznam obrázků

Obrázek 1. Průběh impulzního napětí.....	12
Obrázek 2. Průběh impulzního proudu.....	13
Obrázek 3. Porovnání proudových zkušebních impulzů .....	14
Obrázek 4. Průběh potenciálu země při úderu blesku .....	17
Obrázek 5. Elektromagnetická indukce při úderu blesku.....	18
Obrázek 6. Výpočet nechanických účinků blesk .....	21
Obrázek 7. Zobrazení proudových a časových pojmů stejnosměrného rychlovypínače	27
Obrázek 8. Obecný průběh zkratového proudu střídavé soustavy.....	29
Obrázek 9. Mechanismus vzniku blesku .....	30
Obrázek 10. Oblast ochrany proti přímému blesku na elektrizované trati .....	32
Obrázek 11. Úder blesku do trakční podpěry .....	33
Obrázek 12. Vznik bleskového proudu do kolejových obvodů.....	33
Obrázek 13. Vznik nezabezpečených napětí při uderu blesku .....	34
Obrázek 14. Schéma zapojení svodu od růžkové bleskojistky.....	35
Obrázek 15. Úprava svodu od trakčních bleskojistek.....	37
Obrázek 16. Ukolejňovací vedení na jednom konci připojené na kolejový obvod .....	39
Obrázek 17. Řetězový vodič .....	41
Obrázek 18. Náhradní schéma obvodu s T-články .....	41
Obrázek 19. Náhradní schéma obvodu s T-články .....	43
Obrázek 20. Ukolejňovací vedení připojené na kolejový obvod uprostřed stanic .....	46
Obrázek 21. Náhradní zapojení obvodu s T-články .....	47
Obrázek 22. Náhradní zapojení s T-články .....	49
Obrázek 23. Náhradní schéma obvodu pro stanovení dotykového napětí.....	52
Obrázek 24. Průběh potenciálu na povrchu země při pomyslné uzemňovací elektrodě tvaru polokoule .....	55



# Seznam tabulek

Tabulka 1. Dovolená tělesná napětí (DC 3 kV).....	53
Tabulka 2. Dovolená dotyková napětí (DC 3 kV).....	54
Tabulka 3. Hodnoty napětí a proudů na branách .....	60

# 1. Úvod

V padesátých letech minulého století zahájily tehdejší Československé státní dráhy (ČSD) systematickou elektrizaci tratí a modernizaci zabezpečovací techniky. Počátky elektrizace železničních tratí v ČSR však sahají do roku 1903, kdy byla F. Křižíkem elektrizována trať Tábor - Bechyně stejnosměrným systémem 1400 V (2x700 V) s uzemněným středem) a v roce 1928 pražský uzel trakční soustavou DC 1500 V.

Koncem čtyřicátých let minulého století bylo rozhodnuto o elektrizaci takzvaného hlavního tahu Praha - Košice soustavou DC 3 kV. První ucelené úseky Praha - Česká Třebová a Žilina - Spišská Nová Ves byly dány do provozu v letech 1953 až 1958 (Spišská Nová Ves - Žilina roku 1957 a Česká Třebová - Praha v roce 1958).

Spolu s elektrizací tratí bylo realizováno reléové staniční zabezpečovací zařízení s dvoupásovými kolejovými obvody v železniční stanici Velim a Varín a traťový autoblok Poříčany - Kolín. V roce 1960 bylo rozhodnuto na základě zkoušek jednofázových lokomotiv 25 kV, 50 Hz nejprve s ignitronovými usměřovači, později s výkonovými křemíkovými diodami, o realizaci druhé trakční soustavy AC 25 kV 50 Hz na takzvaném jihozápadním tahu Cheb - Plzeň - České Budějovice a Kutná Hora - Brno - Bratislava - Štúrovo.

V současné železniční síti České republiky jsou tedy používány obě trakční soustavy (v severní části soustava DC 3 kV a v jižní části soustava AC 25 kV 50 Hz). Každá z těchto trakčních soustav má svá specifika, která mohou nepříznivě ovlivnit zejména součinnost trakčního obvodu se systémem elektronického stavědla. Obě trakční soustavy tvoří ve své podstatě jedнопólové vedení, které má některé specifické vlastnosti:

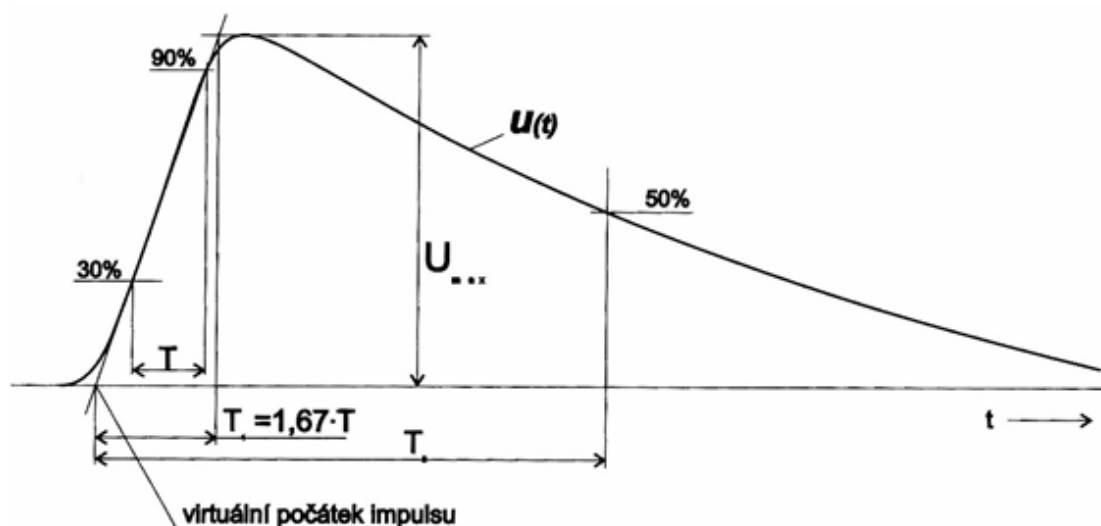
- v podmínkách ČD tvoří zpětné vedení trakčního obvodu kolejnice a země (značná část zpětného trakčního proudu protéká zemí)
- trakční vedení (nosné lano a trolej) je zavěšeno na trakčních podpěrách, případně bránách
- ve většině úseků v některých úsecích je na trakčních podpěrách zavěšeno takzvané zesilovací vedení, paralelně spojené s trolejí

- trakční soustava AC 25 kV 50 Hz je napájena pouze jednostranně, zatímco u soustavy AC 3 kV se používá výhradně napájení dvoustranného
- trakční vedení je chráněno před přepětím v místech, kde se mění impedance vedení pomocí různých typů bleskojistek (zhlaví železničních stanic, v místě připojení napájecích stanic, na koncích trolejového vedení, u neutrálního pole, v místech napájení elektronických stavědel a elektrického ohřevu výměn z trakčního vedení a podobně)
- nelineární zařízení používaná v napájecích obvodech lokomotiv obou trakčních soustav generují vyšší harmonické proudy, které mohou ohrozit funkci dvoupásových kolejových obvodů

## 2. Obecné účinky blesků na elektronická zařízení

Blesk je elektrický proud vysokého kmitočtu, má jako jakýkoli jiný proud procházející elektrickým vodičem účinky. Tyto účinky jsou: tepelné (Joulův efekt), galvanické (zvýšení potenciálu uzemňovací soustavy, nebezpečná napětí způsobená zvýšenou impedancí vodičů vlivem vysoké frekvence, nebezpečí jiskření), elektromagnetické, elektrodynamické, elektrochemické, akustické a světelné. [2]

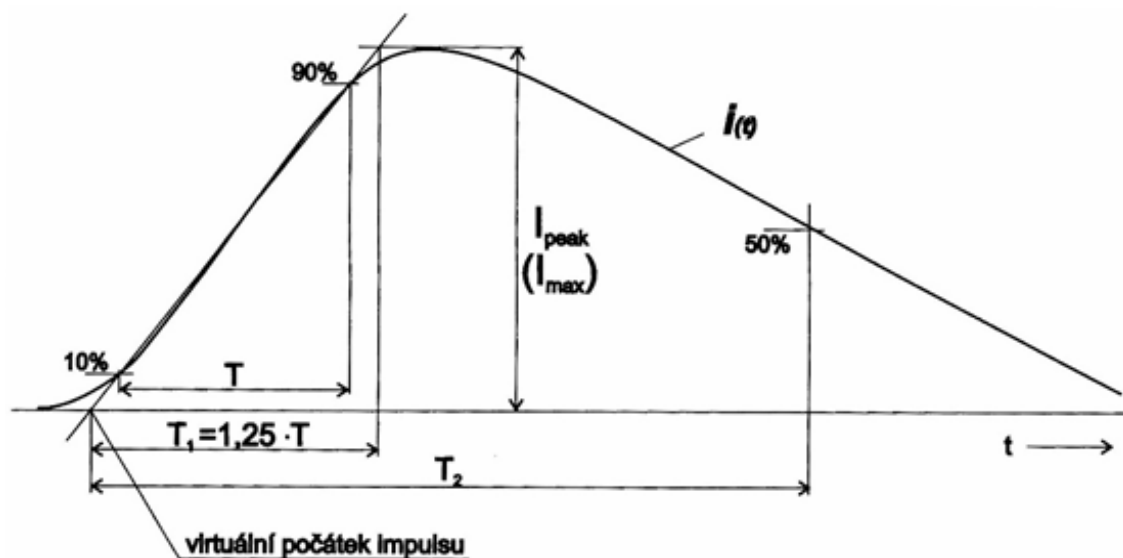
Existuje normalizovaná řada proudových a napěťových průběhů pro různá použití. Díky těmto průběhům je možné provádět testy na přístrojích a konstrukčních přípravcích při stejných podmínkách. Zde jsou normalizované průběhy impulzního napětí a proudu (Obrázek 1. a Obrázek 2.). [2]



Obrázek 1. Průběh impulzního napětí

$U_{max}$ -	vrcholová hodnota impulzního napětí
Čelo impulzu -	část impulzu napětí před vrcholem
$T_1$ -	doba čela napěťového impulzu, je 1,67 násobek časového intervalu mezi okamžiky, kdy okamžitá hodnota, proudu vzroste z 30 % na 90 % vrcholové hodnoty
$T_2$ impulzu -	část impulzu napětí za vrcholem

*Doba půltýlu  $T_2$*  - časový interval mezi virtuálním počátkem impulsu a okamžikem, kdy sledovaný průběh poklesne na 50 % vrcholové hodnoty



Obrázek 2. Průběh impulzního proudu

$I_{max}$  - vrcholová hodnota impulzního proudu

*Čelo impulsu* - část impulsu proudu před vrcholem

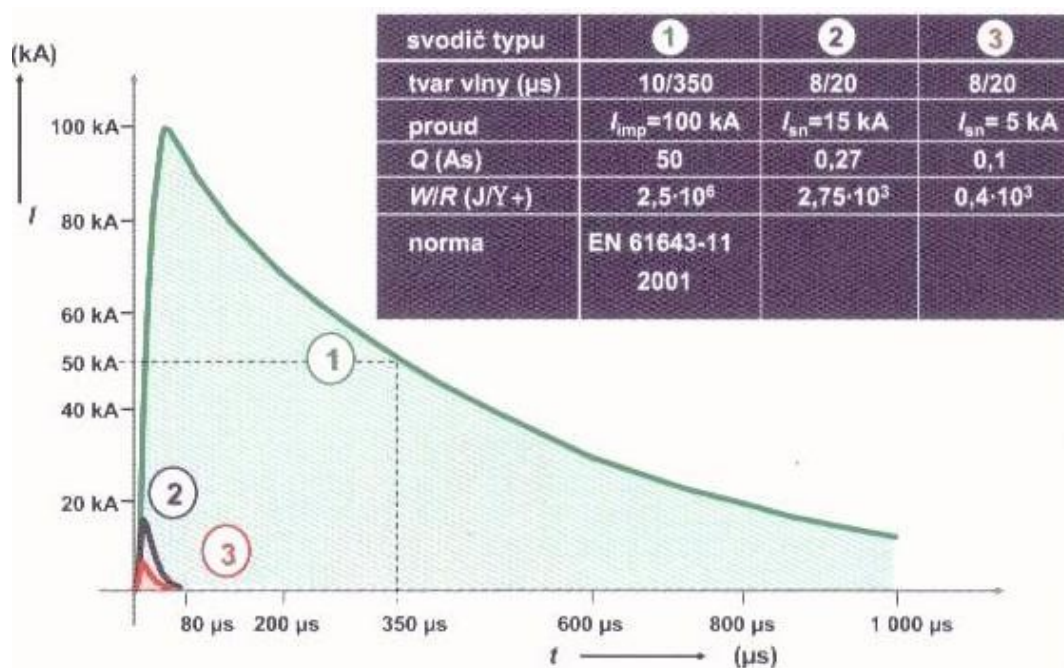
$T_1$  - doba čela napěťového impulsu, je 1,25 násobek časového intervalu mezi okamžiky, kdy okamžitá hodnota, proudu vzroste z 10 % na 90 % vrcholové hodnoty

*Týl impulsu* - část impulsu proudu za vrcholem

*Doba půltýlu  $T_2$*  - časový interval mezi virtuálním počátkem impulsu a okamžikem, kdy sledovaný průběh poklesne na 50 % vrcholové hodnoty

Důležitý údaj při zkouškách svodičů je normalizovaný zkušební proudový impuls. Používají se dva typy. První je zkušební proudový impuls  $I_{max}$  (8/20), který je používán k situaci nepřímých účinků blesků a spínacích přepětí. A druhý je zkušební impuls bleskového proudu  $I_{imp}$  (10/350), ten je používán v situaci bleskového proudu. Porovnání proudových zkušebních vln je na (Obrázek 3.). Na první pohled zde vidíme, že svodič bleskových proudů (impulz 1) musí být schopen, například při přímém úderu blesku, zvládnout mnohonásobně větší energii než svodič přepětí (impulz 2 a 3). Při zkoušce zkušebním impulsem bleskového proudu  $I_{imp}$  (10/350) musí být svodič přibližně 17,5 krát větší než při zkoušce proudovým impulsem  $I_{max}$  (8/20) při stejné amplitudě

impulzu. Z těchto údajů vyplývá rozdílná konstrukce svodičů bleskových proudů (jiskříště a bleskojistky). [2]



Obrázek 3. Porovnání proudových zkušebních impulzů

## 2.1. Tepelné účinky

Tepelné účinky se dají rozdělit do několika skupin.

Zprvé průchodem elektrického proudu vodičem vzniká Jouleovo teplo. To může způsobit, že při úderu blesku dojde k roztavení vodičů, protože tyto vodiče nejsou dimenzovány na přenos takto vysokých bleskových proudů.

Zadruhé může být nějaký kontakt mezi dvěma vodiči nedokonalý a během úderu blesku toto může být příčinou velkého uhřátí, které může vést k roztavení spojovacích částí. Při tomto jevu často dochází ke zpětnému oblouku a rozstříknutí roztaveného kovu. Tento roztavený kov pak může způsobit požár.

Zatřetí je možné, že v mimořádných případech, kdy bleskový proud prochází špatným vodičem například dřevem nebo betonem a způsobí vysoká teplota ohřátí vod v materiálech a tím vznik páry uvnitř materiálu. Následkem toho je roztržení materiálu.

Začtvrté v místech připojení mezi kovovými plochami a zpětným obloukem může vysoký elektrický náboj procházející spojem ve velmi krátkém čase mít za příčinu značné

ohřátí kovu, které je schopno propálit i ocelový plech o síle 2 až 3 milimetry. Škody však mohou být i mnohem větší.

Zapáté přestoupí-li teplota zpětného oblouku zápalnou hodnotu materiálu, může dojít přímému požáru nebo k velmi silnému tepelnému záření. [2]

Pro oteplení materiálu je rozhodující měrná energie  $\frac{W}{R}$  impulzního proudu  $I_{imp}$ , která je přeměřena na odporu 1  $\Omega$ . Je obecně vyjádřena rovnicí:

$$E = \frac{W}{R} = \int i^2 \cdot dt \quad (1)$$

$\frac{W}{R}$  - měrná energie impulzního proudu  $I_{imp}$  ( $\frac{J}{\Omega}$ )

$i$  - okamžitá hodnota proudu (A)

Pro zběžné výpočty můžeme vzít v úvahu pouze dozívající část exponenciálního průběhu, protože doba čela  $T_1$  má na výsledek nepatrný vliv. Pro tento případ pak platí tento přibližný vztah:

$$\frac{W}{R} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{0,7} \cdot I^2 \cdot T_2 \quad (2)$$

$\frac{W}{R}$  - měrná energie impulzního proudu  $I_{imp}$  ( $\frac{J}{\Omega}$ )

$I$  - amplituda proudu (A)

$T_2$  - doba půltýlu (s)

Dosadíme-li například do vztahu hodnotu maximálního bleskového proudu  $I = 200$  kA a dobu půltýlu  $T_2 = 350$   $\mu$ s, je výsledná energie  $10 \frac{MJ}{\Omega}$ . Kontrolní výpočty se provádí jednak při testování svodičů bleskového proudu a výrobce. A v případech, je-li při návrhu hromosvodu potřeba brát v potaz zřetel na ohrožení osob a nebezpečí požáru nebo výbuch. Vysoká tepelná energie může způsobit nejen zničení elektrických rozvodů, ale i narušení zdiva. [2]

## 2.2. Galvanické účinky

Galvanické účinky blesků jsou přímé účinky blesků. Překročí-li napětí mezi dvěma body hranici omezenou izolační pevností prostředí a vzdáleností mezi těmito body, dojde k elektrickým přeskokům. Ve vzduchu k tomuto jevu dochází tehdy, když

elektrické pole dosáhne hodnoty  $30 \frac{kV}{m}$  a vyšší. To je ale závislé na klimatických podmínkách prostředí (tlaku, teplotě a vlhkosti). Tyto potenciální rozdíly se mohou projevit: zaprvé destrukcí elektrických nebo elektronických zařízení, zadruhé jiskřením mezi hromosvodovými svody a blízkými kovovými konstrukcemi spojenými se zemí, které může způsobit požár.

Galvanické účinky řadíme do takzvaných přímých účinků blesku. Jedná se v podstatě o zvýšení potenciálu kolem místa úderu blesku (Obrázek 4.). Napětí vzniklé mezi tímto bodem a vzdálenou zemí je značné. Jeho průběh lze odvodit pomocí vodivé koule o poloměru  $r$  v zemi o rezistivitě  $\rho$ , jejíž odpor ve vztahu k nekonečně vzdálenému bodu je dán vztahem:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (3)$$

$R$  - odpor polokoule ( $\Omega$ )

$\rho$  - průměrná rezistivita země ( $\Omega m$ )

$r$  - vzdálenost mezi místními údery blesku a měřeným bodem (m)

Zanedbáme-li povrchový jev, proudové vodiče blesku se rozprostřou v zemi s homogenní rezistivitou jako paprsky kolmé k povrchu polokoule. Podle této hypotézy je průběh potenciálu vzhledem k velmi vzdálenému bodu hyperbolický a lze jej přibližně vyjádřit vztahem:

$$U \approx \frac{0,2 \cdot I \cdot \rho}{r} \quad (4)$$

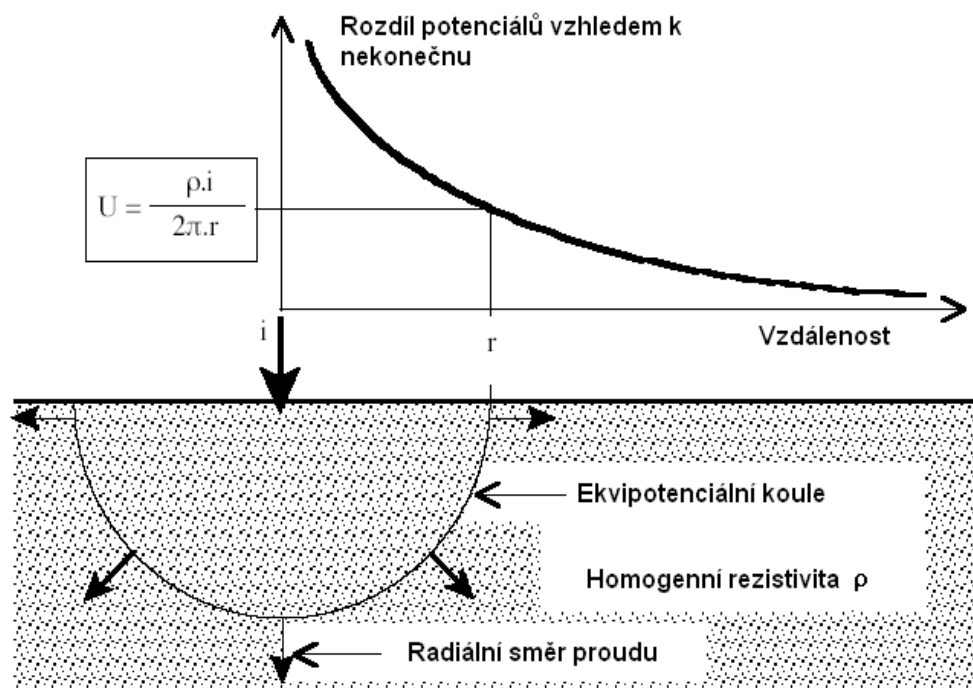
$I$  - bleskový proud (A)

$U$  - napětí mezi měřeným bodem a nekonečně vzdálenou zemí (V)

$r$  - vzdálenost mezi místními údery blesku a měřeným bodem (m)

Riziko poškození elektronických zařízení je relativně vysoké. Proti přímým účinkům blesku se proto musíme účinně bránit. [2]





Obrázek 4. Průběh potenciálu země při úderu blesku

### 2.3. Elektromagnetické účinky

Bleskový kanál, stejně tak jako svodové vedení, kterými prochází bleskový proud do země, vytváří silné elektromagnetické pole. Toto pole může v blízkých vodičích indukovat nebezpečná napětí a proudy. Potenciálové rozdíly mohou být příčinou jiskření v elektrických nebo elektronických prvcích spojených s těmito vodiči. Při větší intenzitě může být toto jiskření příčinou požáru nebo dokonce i jejich zničení, podobně jako při přímém úderu blesku. Zařízení citlivá na elektromagnetické rušení mohou být nejen rušena, ale i zničena při blízkém úderu blesku. Anténou, která vyzařuje pole blesku, je ionizovaný kanál, který je možno nahradit přímočarým, vertikálním vodičem o velké délce (Obrázek 5.). Elektrické pole  $H$  je potom podle Ampérova zákona vyjádřeno vztahem:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (5)$$

$H$  - intenzita elektrického pole  $\left(\frac{A}{m}\right)$

$I$  - bleskový proud (A)

$r$  - vzdálenost mezi bleskem a ohroženou smyčkou (m)

Toto pole je přibližně horizontální. Napětí indukované ve vertikální vodivé, otevřené a uzemněné smyčce magnetickým polem bleskového proudu lze podle Lenzova pravidla vyjádřit vztahem:

$$U = S \cdot \mu_0 \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (6)$$

$U$  - maximální hodnota napětí indukovaná ve smyčce (V)

$S$  - plocha smyčky ( $m^2$ )

$\mu_0$  - dielektrická konstanta ( $\frac{H}{m}$ )

$\frac{\Delta H}{\Delta t}$  - změna intenzity elektrického pole ( $\frac{A}{m \cdot s}$ )

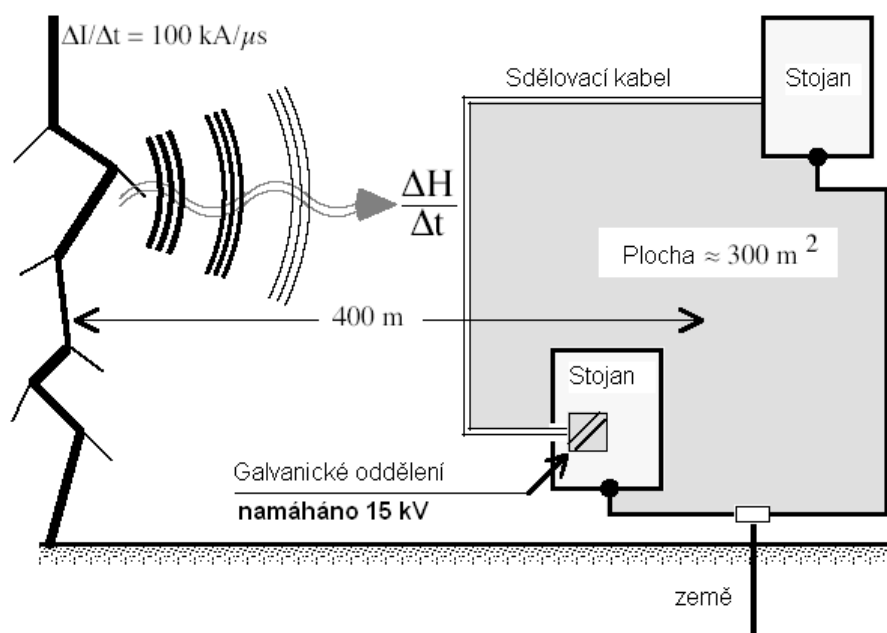
Kombinací těchto dvou rovnic získáme vztah:

$$U = \frac{200 \cdot S \cdot \Delta i}{r \cdot \Delta t} \quad (7)$$

$U$  - napětí indukované ve smyčce (kV)

$\frac{\Delta i}{\Delta t}$  - maximální strmota bleskového proudu ( $\frac{kA}{\mu s}$ )

$r$  - vzdálenost mezi místem úderu blesku a ohroženou smyčkou (m)



Obrázek 5. Elektromagnetická indukce při úderu blesku

Tento vztah lze použít při vzdálených úderech blesku. Při přímém a blízkém úderu musíme provést přesnější výpočet indukčnosti  $M$  a tu pak dosadit do následující rovnice vyjadřující indukční zákon:

$$U_i = M \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (8)$$

$U_i$  - napětí (kV)

$M$  - vzájemná indukčnost  $\left(\frac{H}{m}\right)$

$\frac{\Delta i}{\Delta t}$  - změna proudu  $\left(\frac{A}{s}\right)$

Přepětí indukovaná elektromagnetickým polem blesku mají krátké trvání a jejich amplituda závisí zejména na rychlosti změny proudu, který je indukován v příslušných obvodech. Tato rychlost změny souvisí se strmostí bleskového proudu a tedy s profilem indukované magnetické vlny. [2]

Jednotlivé části proudového impulsu, doba čela, vrcholová hodnota (amplituda) a doba půltýlu mají destrukční nebo rušivé účinky:

- doba čela - některé diskrétní prvky (například triaky a tyristory) jsou narušeny nebo zničeny impulzy s nízkou úrovní, ale velkou strmostí čela ( $du/dt$  a  $dl/dt$ ),
- vrcholová hodnota - u některých prvků dojde ke zničení již při praskání způsobeném dovolenými hodnotami přepětí, jedná se například o kondenzátory, diody a ochranné vrstvy polovodičů,
- doba půltýlu - impulzy dlouhého trvání poškozují většinu komponentů v důsledku energie, která jimi projde.

Kromě destrukcí prvků a obvodů může rušení vyvolané elektromagnetickou indukcí způsobit funkční poruchy i nízkými impulzy v citlivých elektronických zařízeních. Jako jsou mikroprocesory, paměťové a logické obvody. Uvádíme několik příkladů:

- nekontrolovaný rozběh nebo zastavení automaticky řízeného stroje
- chybná funkce zařízení
- rušení informačních programů
- opožděné spuštění poplachové ústředny
- chybná signalizace nebo výpočet (například výsledky měření)

Je zřejmé, že rušení elektrických zařízení hraje významnou roli při zajištění bezpečnosti a může být příčinou vážných nehod. Výsledky celoevropských průzkumů ukazují, že nehody těchto typů nejsou vzácností. Je třeba ještě zdůraznit, že trvalé nedestruktivní napěťové a proudové přetěžování způsobuje předčasné stárnutí celé řady elektrických komponent. [2]

Měli bychom si též uvědomit, že:

- destruktivní účinky blesku se mohou projevit na elektronických zařízeních vzdálených od místa úderu i několik kilometrů
- kabelové připojení objektu nechrání elektrická a elektronická zařízení umístěná uvnitř objektu od elektromagnetického účinku blesku

Z dostupných materiálů je známo, že pouze asi 10 % blesků překročí hodnotu 120 kA/ $\mu$ s. Udeří-li však takový blesk například 100 m od elektronického systému, indukuje ve smyčce o ploše 1 m<sup>2</sup> špičku napětí 240 V. Dokonce i v případech, kdy smyčka není vertikální, nebo magnetické pole zasáhne jen část smyčky, může dosáhnout hodnota indukovaného napětí několika stovek voltů na 1 m<sup>2</sup>. Magnetická indukce je pro elektronická zařízení nejvážnější hrozbou, a to i v případech, kdy je zařízení odpojeno od napájecí sítě. Zkušenosti ukazují, že nepříznivý vliv magnetického pole blesku na tato zařízení se projevuje mnohem častěji než účinky galvanické. Pouze zařízení, jehož všechny kabely jsou odpojeny nebo stíněny, jsou bez rizika. [2]

## 2.4. Elektrodynamické účinky

Elektrodynamický jev může vzniknout ve vodiči, kterým prochází vysoký proud a který se nachází v magnetickém poli vyvolaném jiným proudem. Tento efekt můžeme přirovnat k účinku zkratového proudu ve sběrnících rozvodny. Dynamické účinky jsou buď přitažlivé, nebo odpudivé, v závislosti na směru proudu ve vodičích. Vzniklé síly dosahují hodnot několika set až tisíc newtonů při intenzivních blescích a jsou schopny mechanicky deformovat zařízení. K těmto jevům dochází zejména působením dílčích bleskových proudů na vodiče uvnitř budovy. [2]

Lze odvodit, že na dva paralelní stejně dlouhé vodiče ve vzduchu, kterými protékají stejné proudy, působí síla:

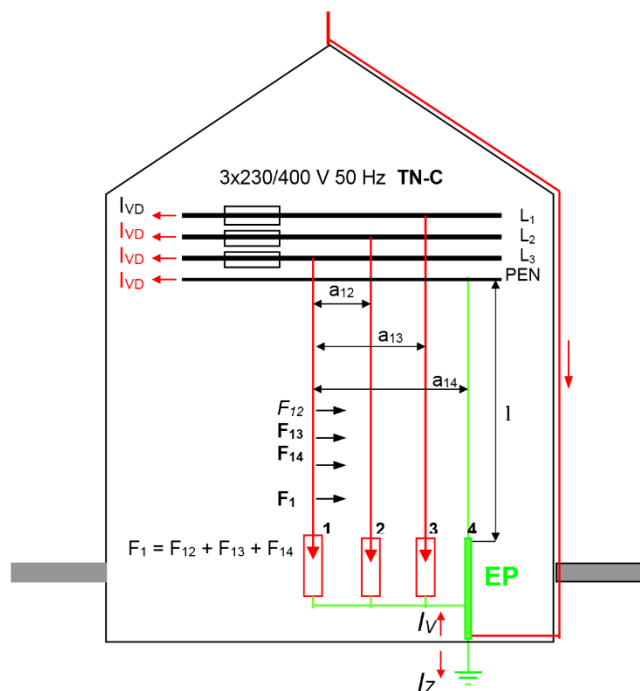
$$F = 2 \cdot 10^7 \cdot \frac{l}{a} \cdot i^2 \quad (9)$$

- $F$  - síla (N)
- $l$  - délka paralelních vodičů (m)
- $a$  - vzdálenost vodičů (m)
- $i$  - proud (A)

Prochází-li bleskový proud více paralelními vodiči, například vodiči soustavy TN-C (při přímém úderu blesku přes sběrnici pro vyrovnání potenciálu a přes bleskojistky), mají dílčí proudy stejný směr a jsou tedy magnetickými silami vzájemně přitahovány. Na vodič „1“ čtyřvodičové soustavy působí pak výsledná síla  $F$ , daná součtem příslušných dílčích sil (Obrázek 6.):

$$F = F_{12} + F_{13} + F_{14} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( \frac{l}{a_{12}} + \frac{l}{a_{13}} + \frac{l}{a_{14}} \right) \cdot I_{dí}^2 \quad (10)$$

- $F$  - síla (N)
- $l$  - délka paralelních vodičů (m)
- $a_{12}$  - vzdálenost vodičů (m)
- $I_{dí}^2$  - dílčí bleskový proud (A)



Obrázek 6. Výpočet nechanických účinků blesk

Je patrné, že síly působící na paralelní vodiče jsou přímo úměrné druhé mocnině proudu a délce souběhu a nepřímo úměrné vzdálenosti vodičů. Výsledná síla může v extrémním případě dosáhnout hodnoty okolo 2000 N. Bleskový proud nelze ovlivnit a délku souběhu jen velmi omezeně. Můžeme však snížit dílčí bleskové proudy tím, že vybudujeme kvalitní zemnicí systém s důsledně provedenou soustavou pro vyrovnání potenciálu, takže je do země svedena větší část bleskového proudu. Kromě toho je vhodné volit dostatečně velké vzdálenosti vodičů i bleskojistek a používat dostatečně dimenzované vodiče. [2]

### **2.5. Elektrochemické účinky**

Tyto účinky se obecně projevují na zařízeních uložených v zemi narušováním jejich struktury elektrolýzou (korozivní účinek). Její účinky mohou být značné při přenosu vysokého bleskového náboje. Doporučuje se proto provádět pravidelnou kontrolu uzemňovací sítě. [2]

### **2.6. Akustické účinky**

Elektrodynamické síly spojené s bleskovým proudem způsobí roztažení vzduchu v bleskovém kanálu doprovázené zvýšením tlaku v tomto kanálu.

Tato násilná změna má za následek vznik rázové vlny šířící se vzduchem, která má destruktivní účinky na své okolí. [2]

### **2.7. Světelné účinky**

Poškození těmito účinky je omezeno pouze na optická zařízení. U člověka je nebezpečí ohrožení jeho zrakových orgánů. [2]

### **3. Specifika železničních elektronických zabezpečovacích zařízení z hlediska jejich činnosti a optimální ochrany proti přepětím**

#### **3.1. Základní podmínky účinné ochrany elektronického zabezpečovacího zařízení**

Elektronická zařízení jsou obecně velmi citlivá na přepětí. Největším nebezpečím pro tato zařízení jsou přímé a blízké údery blesku, jejichž účinky se projevují nejen galvanicky působícími proudy a zvýšením napěťové hladiny v místě úderu blesku a jeho okolí, ale zejména nebezpečným indukovaným napětím vlivem silného elektromagnetického pole vyvolaného vysokým bleskovým proudem řádu desítek kA se strmým nárůstem čela bleskové vlny.

Železniční elektronický zabezpečovací systém je složité zařízení, které musí mít vysokou spolehlivost a pohotovost, odpovídající potřebám bezpečného železničního provozu. Jeho jednotlivé funkční prvky jsou umístěny jak uvnitř budov, tak i vně objektů v železničních stanicích a na tratích, a tedy v otevřeném venkovním prostředí, kde se uplatňují ve značné míře indukční účinky bleskového proudu, ať již při blízkých či vzdálenějších výbojích. Hledání optimálního systému přepětěových ochrany vyžaduje proto zcela zvláštní přístup.

Trakční vedení obou trakčních proudových soustav a osvětlovací stožáry působí sice jako ochranná jímací soustava a údery blesku jsou tedy převážně zachyceny exponovanými částmi trakčního vedení nebo osvětlovacími stožáry. Tím je prakticky chráněno venkovní zařízení elektronického stavědla před přímými údery blesku.

Na druhé straně však musíme vzít v úvahu, že účinky těchto bleskových výbojů se při napájení elektronických stavědel z trakčního vedení mohou galvanickou cestou přenést jednak do napájecího zdroje UNZ nebo UPS, jednak kolejemi (přes ukolejňovací průrazy) do elektrických obvodů vlastního stavědla.

Z těchto objektivních pohledů je zřejmé, že železniční elektronická zabezpečovací technika je investičně a provozně velmi nákladné zařízení, které vyžaduje optimální ochranu proti účinkům blesku a současně zajištění spolehlivé funkce elektrických zabezpečovacích obvodů.

Aby byla tato ochrana účinná, musí být řešena komplexně, a to nejen ze všech tří základních hledisek definovaných v souboru evropských norem ČSN EN 62305, která mají obecnou platnost, ale i s přihlédnutím ke specifickým podmínkám na železničních tratích s elektrickou trakcí. Jedná se o následující kritéria:

- vnější ochrana budovy stavědla
- vyrovnání potenciálu a společné uzemnění
- ochrana technologického zařízení (vnitřního a vnějšího)
- na elektrizovaných tratích musíme kromě toho vzít v úvahu nebezpečí vniknutí bleskového proudu ze soustavy trakčního vedení do kolejových obvodů, které může vážně ohrozit činnost zabezpečovacích zařízení [1]

Komplexní účinný systém ochrany elektronické zabezpečovací techniky před účinky blesků však vyžaduje koordinovanou činnost všech složek, které se podílejí na investiční výstavbě, zejména ve stádiu zpracování prvního stupně projektové dokumentace.

Na této úrovni projektové přípravy nejsou dosud v dostatečné míře uplatňovány ani základní požadavky evropských norem, ani zvláštní podmínky pro zajištění optimální činnosti elektronické zabezpečovací techniky na tratích s elektrickou trakcí.

Vlastní ochranný systém elektronických stavědel a přejezdů před účinky blesků, který byl u AŽD postupně vyvíjen od roku 1998, odpovídá současné evropské úrovni ochrany železničních elektronických zařízení před účinky blesků, avšak nelze jej považovat za optimální řešení. Důvodem je skutečnost, že dosud nejsou vytvořeny podmínky pro splnění následujících požadavků pro komplexní řešení ochrany:

- není zajištěna koordinace vnější ochrany budovy s ochranou stavědlové ústředny
- u nových staveb není uspokojivě řešeno vyrovnání potenciálu a uzemnění celé
- u nových staveb není řešeno odstínění místností stavědlové ústředny, které chrání elektronické zařízení před elektromagnetickými vlivy



- není dořešena ochrana proti vniknutí bleskového impulzu do koleje při úderu do trakčního vedení [1]

### **3.2. Nebezpečné stavy trakčních soustav ovlivňující činnosti elektronických zabezpečovacích zařízení**

Bezpečný a plynulý provoz na elektrizovaných železničních tratích vybavených moderní elektronickou zabezpečovací technikou vyžaduje úzkou součinnost použitých napájecích soustav, a to jak z hlediska jejich bezpečné a spolehlivé funkce, tak i z hlediska požadavků ochrany před úrazem elektrickým proudem a potřeb účinné ochrany zejména citlivých elektronických systémů před nebezpečnými účinky blesků.

Řešení této jednoduše definované problematiky je však z mnoha důvodů úkolem velmi složitým a náročným. Dokladem toho je skutečnost, že od padesátých let minulého století, kdy byly v tehdejší Československu uvedeny do provozu první ucelené úseky tratí elektrizované systémem DC 3 kV, nejsou některé důležité technické problémy týkající se součinnosti trakčního obvodu se zabezpečovacími systémy dosud zcela vyřešeny.

Složitost součinnosti trakčních a zabezpečovacích systémů nám přiblíží následující přehled vlivů, které mohou ohrozit činnost elektronického zabezpečovacího zařízení nebo způsobit nebezpečná dotyková napětí na neživých částech zařízení v kolejišti. [1]

#### **3.2.1. Účinky trakční soustavy DC 3 kV:**

- vysoké zkratové proudy, které mohou způsobit nebezpečná dotyková napětí na zařízeních v kolejišti
- zpětné zemní proudy, jejichž korozivní účinky narušují kovová vedení v zemi
- problémy přinášejí případy sdělovacích a zabezpečovacích vedení, která jsou ohrožována indukovaným napětím při souběhu s veřejným energetickým vedením VN a VVN

#### **3.2.2. Účinky trakční soustavy AC 25 kV 50 Hz**

- vysoké zkratové proudy, které mohou způsobit nebezpečná dotyková napětí na zařízeních v kolejišti
- nebezpečná napětí indukovaná na žilách souběžných vedení

Pro automatické vypnutí trakčních obvodů obou trakčních soustav při zkratu musejí být neživé části zařízení v kolejišti spojeny se zpětným vedením (kolejemi).

U trakční soustavy DC 3 kV nesmí být neživé uzemněné části zařízení připojovány přímo na kolej, aby se nerozšiřoval únik trakčního proudu do země.

Na tratích AC 25 kV 50 Hz s dvoupásovými kolejovými obvody, které se na českých železnicích v široké míře používají, musejí být neživé části zařízení v kolejišti připojovány ke koleji rovněž nepřímo prostřednictvím takzvaných kolejových průrazek (omezovačů napětí).

Při poruše průrazky (zůstane-li ve vodivém stavu) může dojít k nebezpečným obchozím cestám, které ohrožují bezpečnou funkci kolejových obvodů.

Při průjezdu vlaku se potenciál kolejí vůči zemi mění v závislosti na jeho vzdálenosti od napájecí stanice. Maximální hodnota napětí mezi kolejí a zemí závisí zejména na přechodovém odporu koleje-země. Čím větší je tento přechodový odpor (například u nových či rekonstruovaných tratí), tím větší je nebezpečí chybného zapůsobení kolejové průrazky a vzniku nebezpečného napětí na neživé části zařízení v kolejišti.

Protože zpětné vedení trakčního obvodu tvoří na českých železnicích pouze kolejnice a země, nelze zcela vyloučit vznik nebezpečných dotkových napětí na neživých částech zařízení při zkratu na trakčním vedení.

Soustava trakčního vedení chrání zařízení v kolejišti proti přímému úderu blesku, avšak ke vniknutí bleskového proudu do kolejových obvodů dochází přes kolejové průrazky a bleskojistky chránící trakční vedení, transformátory a statické měniče pro napájení zabezpečovacích zařízení a elektrického ohřevu výměn (EOV) z trakčního vedení. Citlivá elektronická zařízení stavědla mohou nepříznivě ovlivnit nejen galvanické, ale i induktivní účinky bleskového impulzu.

Regulační obvody s nelineárními prvky v napájecích obvodech lokomotiv jsou zdrojem vyšších harmonických proudů, které mohou nebezpečně působit na dvoupásové kolejové obvody. Zdrojem harmonických jsou též statické měniče pro vytápění, osvětlení a klimatizaci vagonů a přechodové jevy při vypínání a zapínání trakčního obvodu.

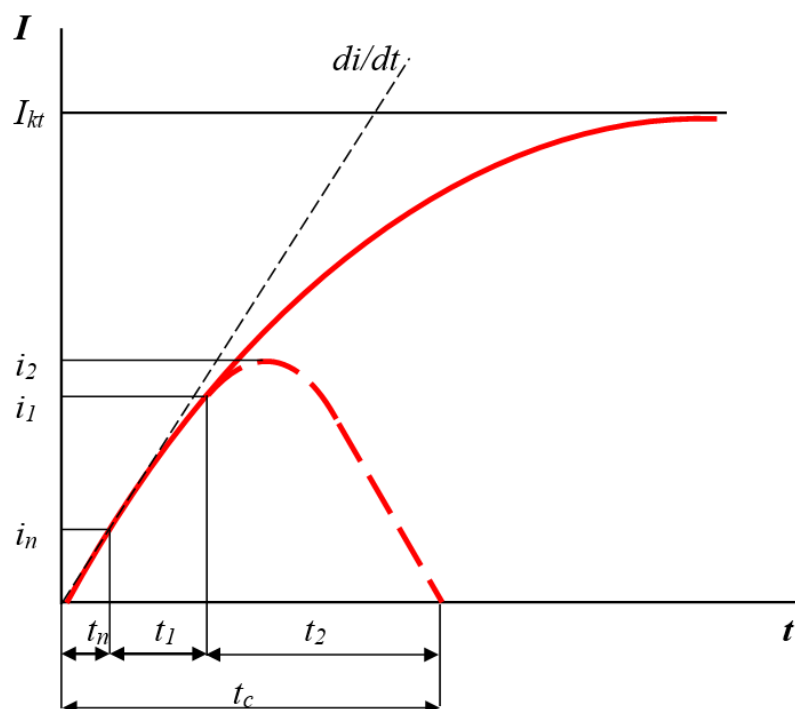
Ze stručného přehledu vlivů, které je třeba brát v úvahu při součinnosti trakčního a zabezpečovacího systému, je patrné, že v mnoha případech jsme nuceni hledat kompromisní řešení.

Některá konkrétní navržená opatření pro zlepšení současného stavu jsou podrobněji popsána a vysvětlena v následujících částech. [1]

### 3.2.3. Zkratové proudy v soustavě DC 3 kV

Zkratový proud způsobuje v trakčním obvodu kromě tepelných a dynamických účinků též nebezpečná dotyková napětí, která mohou ohrozit životy osob jak v drážních, tak i ve veřejných prostorech. Průběh stejnosměrného proudu při zkratu je znázorněn na (Obrázek 7.).

Proud se od okamžiku zkratu zvětšuje exponenciálně až do ustálené hodnoty  $I_{kt}$ , která je dána napětím a rezistancí obvodu.



Obrázek 7. Zobrazení proudových a časových pojmů stejnosměrného rychlovypínače

- $I_{kt}$  - trvalý zkratový proud
- $di/dt$  - strmost nárůstu proudu závisí na R/X obvodu
- $i_v$  - nastavená hodnota vypínacího proudu
- $i_1$  - proud při otevření kontaktů

$i_2$ -	omezení zkratového proudu
$t_v$ -	doba spuštění
$t_1$ -	vypínací zpoždění
$t_2$ -	doba hoření
$t_c$ -	celková vypínací doba

Speciální vypínače na stejnosměrný proud (takzvané rychlovypínače) jsou upraveny tak, že jejich vybavovací spoušť reaguje ne na velikost zkratového proudu, ale na jeho strmost ( $di/dt$ ). Tím se dosáhne toho, že vypínač vypíná mnohem dříve, než zkratový proud dosáhne maximální hodnoty, která je několikanásobně vyšší než při zkratu na soustavě AC 25 kV 50 Hz.

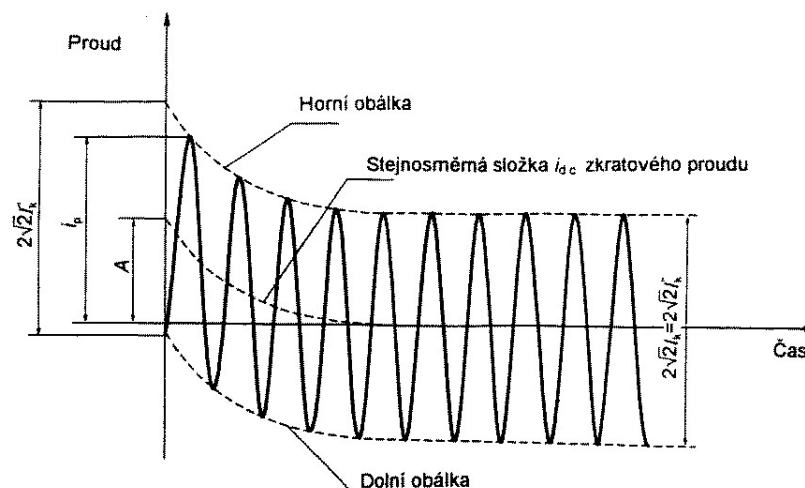
Zkratovou vypínací schopnost rychlovypínače nelze udat v absolutní hodnotě, protože závisí na mnoha parametrech jak vlastního rychlovypínače (například na strmosti nárůstu napětí na oblouku, řízení oblouku, provedení zhasací komory), tak na vlastnostech napájeného zařízení (například na rezistanci trakčního obvodu, nastavení nadproudových ochran).

Zkratové proudy dosahují v soustavě DC 3 kV hodnoty okolo 10 kA při vypínacím čase 50 ms.

Objektivní hodnoty dotykových napětí je proto možné zjistit pouze měřením na neživých částech při zkratu v trakčním obvodě.

### **3.2.4. Zkratové proudy v soustavě AC 25 kV 50 Hz**

Zkratový proud v trakčním obvodě soustavy AC 25 kV 50 Hz má, stejně jako soustava DC 3 kV, tepelné a dynamické účinky a způsobuje též nebezpečná dotyková napětí, která mohou ohrozit životy osob jak v drážních, tak i ve veřejných prostorech. Kromě toho nepříznivě působí na souběžná kabelová vedení indukci nebezpečných napětí. Časový průběh střídavého proudu při zkratu je znázorněn na (Obrázek 8.)



Obrázek 8. Obecný průběh zkratového proudu střídavé soustavy

- $I_k''$  - počáteční rázový zkratový proud
- $i_p$  - nárazový zkratový proud
- $I_k$  - ustálený zkratový proud
- $I_{dc}$  - stejnosměrná složka zkratového proudu
- $A$  - počáteční hodnota stejnosměrné složky

Na sinusový průběh zkratového proudu má vliv zejména okamžik vzniku zkratu. Prochází-li při vzniku zkratu napětí nulovou hodnotou, jde o nesouměrný zkrat s maximální stejnosměrnou složkou. Pokud fázové napětí prochází maximální kladnou nebo zápornou okamžitou hodnotou, potom jde o zkrat souměrný bez stejnosměrné složky. Při praktických výpočtech nás zajímá efektivní hodnota souměrné střídavé složky a nárazový proud. Za efektivní hodnotu střídavé složky se v praxi považuje okamžitá pořadnice obálky skutečného průběhu této složky dělená  $\sqrt{2}$ .

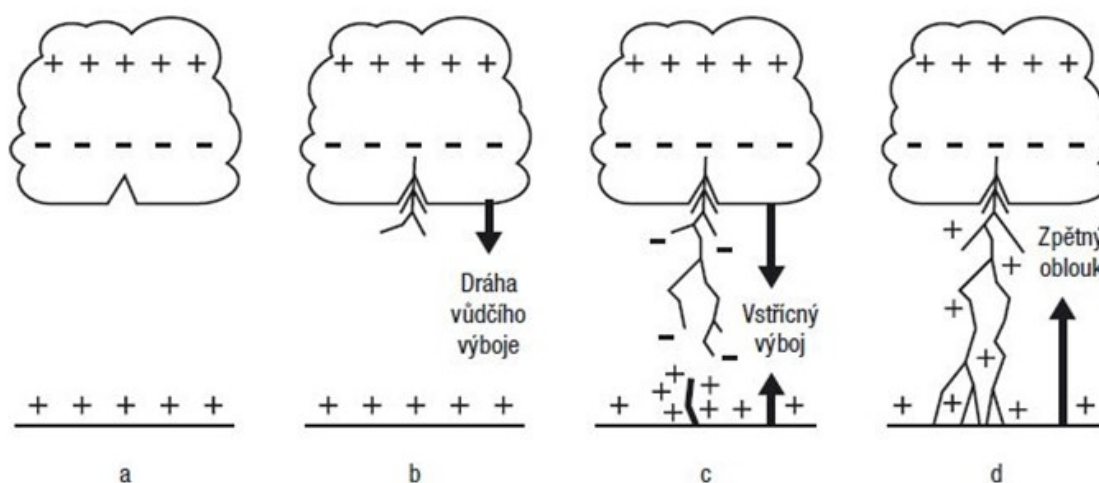
Zkratové proudy v trakční soustavě AC 25 kV 50 Hz dosahují při dnešních výkonech trakčních transformátorů a zkratových výkonech energetické soustavy 110 kV hodnot do 4 kA při vypínací době 100 ms. [1]

## 4. Současný stav ochrany elektronických stavědel a přejezdů proti účinkům blesků

Stavědlová zařízení, která se nacházejí v kolejišti, jsou proti přímému úderu blesku chráněna soustavou trakčního vedení a osvětlovacími stožáry nebo osvětlovacími věžemi.

To vyplývá z mechanismu vzniku blesku (Obrázek 9.) a z elektrogeometrického modelu, pomocí kterého stanovujeme nejpravděpodobnější místo úderu blesku (Obrázek 10.).

Předpokládáme-li negativní blesk, který se vyskytuje v 90% případů, je spodní část mraku cumulonimbusu nabitá záporně, země má náboj pozitivní. Dráha vůdčího výboje postupuje stupňovitě od mraku směrem k zemi a udržuje sestupný směr blesku. Jakmile se negativní dráha přiblíží k zemi, elektrické pole vzroste (částičky opačných nábojů se přitahují) a objeví se pozitivní vstříčný výboj směřující od země k mraku. Když se obě dráhy setkají, vytvoří se vodivý kanál mezi mrakem a zemí, kde hraje důležitou roli rozdíl elektrických nábojů. Tento kanál umožní průchod elektrického proudu vysoké intenzity bleskový výboj nebo též zpětný oblouk. [1]



Obrázek 9. Mechanismus vzniku blesku

Vzdálenost, kde se obě dráhy setkají, je takzvaná jímací vzdálenost  $D$ , která je definována elektrogeometrickým modelem.

Jedná se o model fyzikálně-matematické předpovědi. Jeho účelem je stanovit co nejpravděpodobnější místo úderu blesku, a umožnit tak stanovení rozsahu případných škod, a pokud je to potřebné, navrhnout ochranná zařízení (hromosvody, ochrannou síť nebo zavěšený ochranný vodič).

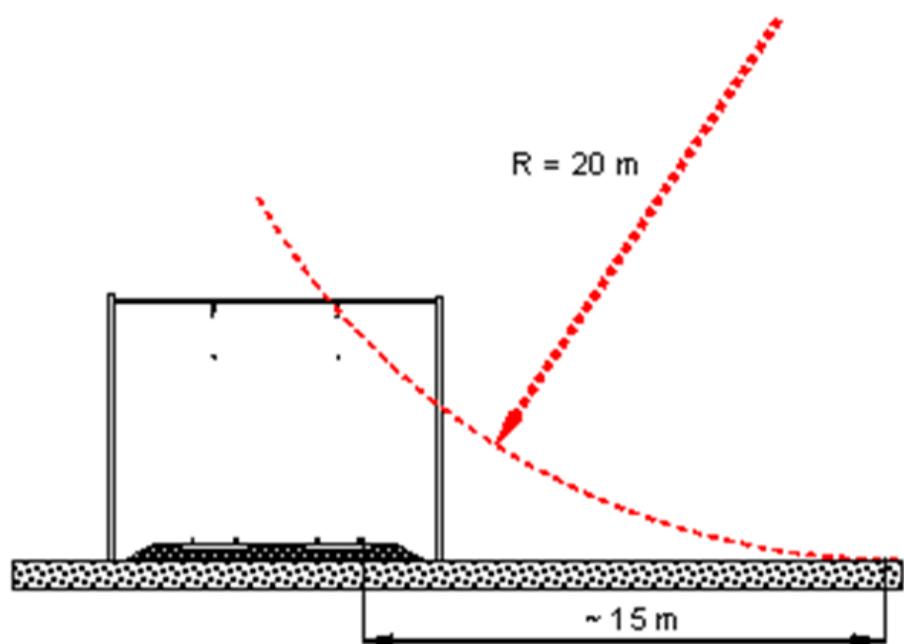
Je třeba připomenout, že současná podoba elektrogeometrického modelu platí pouze pro sestupné negativní bleskové údery.

Elektrogeometrický model definuje vzdálenost  $D$ , nazývanou jímací vzdálenost, jako funkci špičkové hodnoty bleskového proudu. Je vyjádřen empirickým vztahem: [1]

$$D = 10 \cdot I^{2/3} \quad (11)$$

$D$  - vzdálenost mezi vrcholem vzestupného blesku a objektem na zemi (m)

$I$  - špičková hodnota spodní meze rozsahu bleskového proudu (kA) pro danou ochrannou úroveň



Obrázek 10. Oblast ochrany proti přímému blesku na elektrizované trati

Jímací vzdálenost je vzdálenost mezi nejvyšším bodem objektu, kde je místo vzestupného výboje, a místem, kde se spojí vrchol sestupného výboje s vrcholem výboje vzestupného (vstřícného).

Ochranné úrovně vytvořené ochrannými systémy jsou definovány metodou valící se koule o poloměru  $R$ , který se rovná vzdálenosti  $D$ .

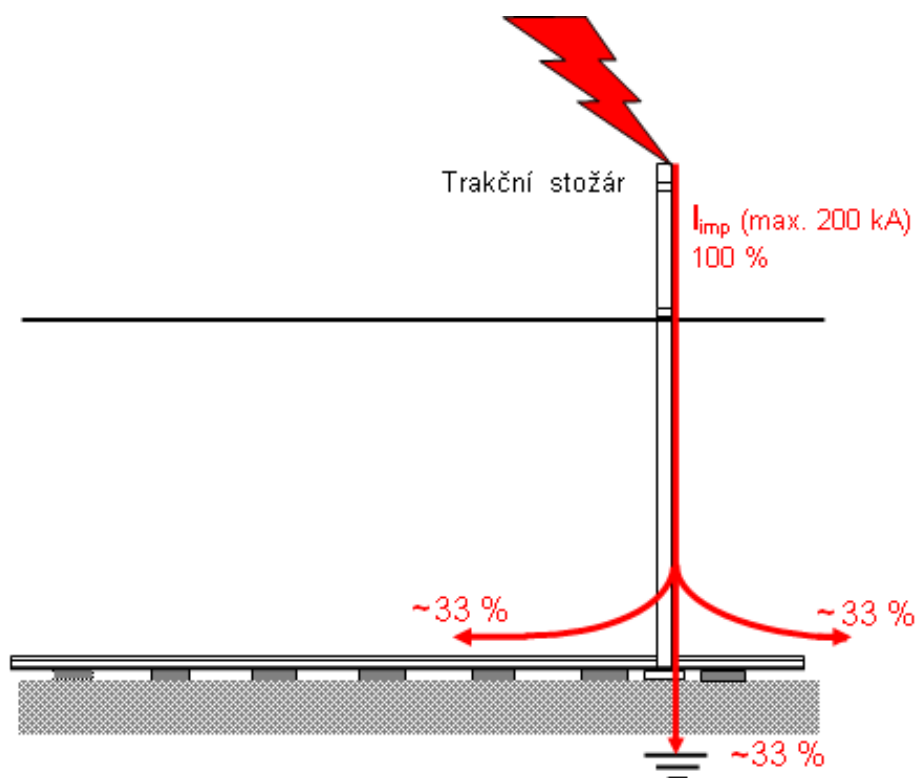
Železniční zabezpečovací techniku je třeba zařadit do třídy LPSI (třída ochrany před bleskem resp. ochranná úroveň), pro kterou se předpokládá nejnižší bleskový proud 2,8 kA, kdy je účinnost ochrany 0,95 až 0,98. Tento proud dosadíme do výše uvedeného vztahu. Oblast ochrany proti přímému úderu blesku na elektrizované trati je znázorněna na obr.

Bleskový proud však vniká do kolejových obvodů nepřímo přes růžkové bleskojistky umístěné na trakčním vedení obou staničních zhlaví, nebo přes ventilové bleskojistky umístěné na trakčním vývodu pro staniční transformovnu AC 25/0,4 kV nebo statický měnič DC 3/2 x 0,23 kV.

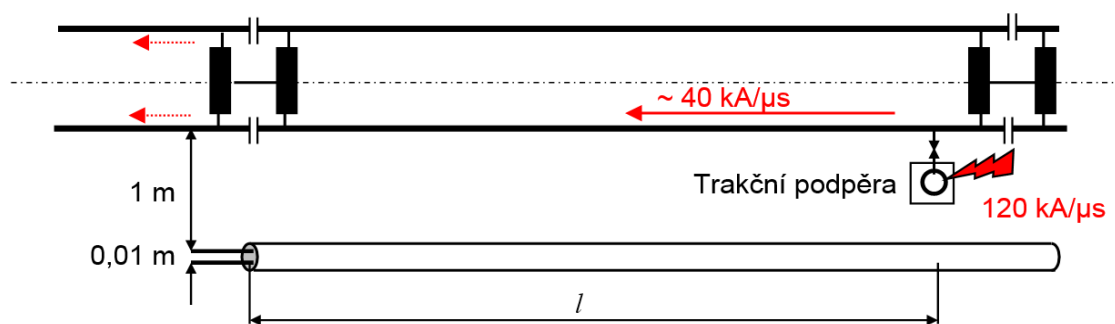
Kromě toho při úderu blesku do trakční podpěry, případně do konstrukce osvětlovacího zařízení, nebo při přeskočení bleskového proudu z trakčního vedení na trakční podpěru, vnikne bleskový proud přímo do kolejového obvodu (Obrázek 11.), neboť tyto konstrukce musejí být chráněny před úrazem elektrickým proudem připojením přes kolejovou průrazku na zpětné kolejnicové vedení.

Následkem toho se jednak nebezpečně zvýší potenciál kolejí v okolí připojení na kolejnici, jednak je zabezpečovací zařízení přímo galvanicky ohroženo bleskovým proudem (například zničení stykových transformátorů), případně jeho účinky elektromagnetickými, které se mohou projevit i ve stavědlové ústředně. Zde máme obecně na mysli zejména tratě, které jsou vybaveny dvoupásovými kolejovými obvody. Nebezpečí indukovaných napětí je znázorněno na (Obrázek 12.) [1]



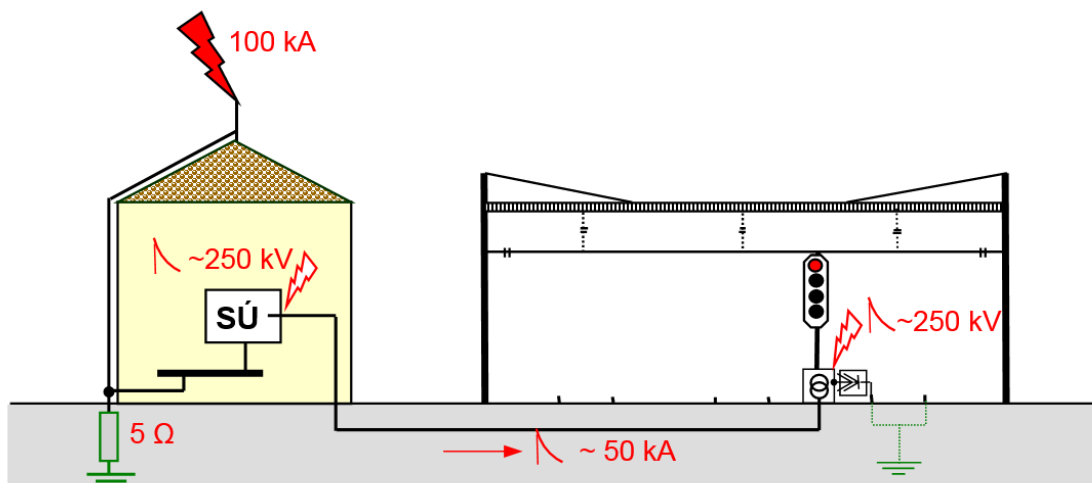


Obrázek 11. Úder blesku do trakční podpěry



Obrázek 12. Vznik bleskového proudu do kolejových obvodů

V souvislosti s problematikou vyrovnání potenciálu je třeba upozornit na důležitý jev, který může mít nebezpečný účinek na elektronická zařízení. Jedná se o případy, kdy blesk udeří do vnější ochrany chráněného objektu nebo do blízké budovy. Obecný případ je znázorněn na (Obrázek 13.).



Obrázek 13. Vznik nezabezpečených napětí při uderu blesku

Např. při úderu blesku o intenzitě 100 kA do vnější ochrany budovy vznikne na rezistanci  $5 \Omega$  její uzemňovací soustavy vůči vzdálené zemi potenciál 500 kV. Propojovací vedení se zařízením v návěstidle pak způsobí přenesení nebezpečného potenciálu na toto zařízení a namáhá izolaci kabelů a ostatních zařízení zapojených v tomto obvodě.

Z uvedeného je zřejmé, že účinná ochrana zabezpečovací techniky proti účinkům blesku na elektrizovaných tratích musí být řešena v návaznosti na trakční obvod. [1]

## 4.1. Možnosti zlepšení současného stavu

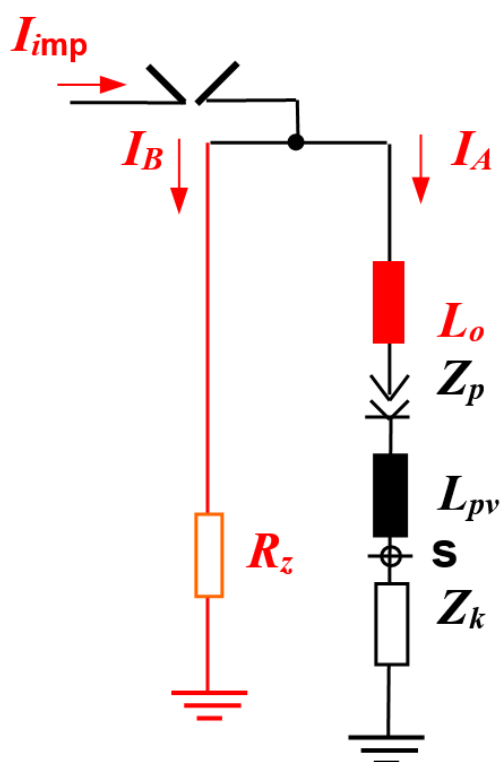
Nepříznivé účinky bleskového proudu na elektronická zařízení stavědla lze snížit na elektrizovaných tratích ČD dvěma poměrně snadno realizovatelnými způsoby:

- omezením průniku bleskového proudu do kolejových obvodů v místech svodů od bleskojistek umístěných na trakčním vedení
- vodivým propojením trakčních podpěr v železničních stanicích ukolejňovacím vedením při zachování podmínek pro zpětný (zkratový) proud při průrazu trakčního napětí na trakční podpěru a při dodržení dotykových napětí předepsaných normou ČSN EN 50122-1 ed. 2

### 4.1.1. Úprava svodů od bleskojistek

Současný nevyhovující stav ukolejňování svodů od bleskojistek umístěných na trakčním vedení je možno výrazně zlepšit zvětšením indukčnosti mezi svodem

od průrazky ke kolejnici, tedy připojením růžkové bleskojistky paralelně na samostatné uzemnění a svod od průrazky připojit na střed stykového transformátoru (Obrázek 14.).



Obrázek 14. Schéma zapojení svodu od růžkové bleskojistky

- $R_z$  - rezistance uzemnění růžkové bleskojistky
- $L_0$  - indukčnost ochranné tlumivky
- $Z_p$  - impedance kolejové průrazky ( $Z_p = 0$ )
- $L_{pv}$  - indukčnost propojovacího vodiče
- $Z_k$  - impedance kolejí (při  $I_{imp}$ )
- $s$  - střed stykového transformátoru
- $I_{imp}$  - bleskový proud
- $I_A, I_B$  - rozdělení bleskového proudu do větví

Při zvolených vstupních parametrech by se bleskový proud tekoucí do stykového transformátoru snížil vřazením tlumivky 20  $\mu\text{H}$  o více než 50 %. Do jednotlivých pásů obou kolejových obvodů by tekli při blesku 10  $\text{kA}/\mu\text{s}$  proud 126,5 A a při blesku 20  $\text{kA}/\mu\text{s}$  cca 507 A. Napětí na středu kolejové tlumivky se sníží z 8 820 V na 3 917 V. Tyto hodnoty již neohrozí zabezpečovací techniku v kolejišti.

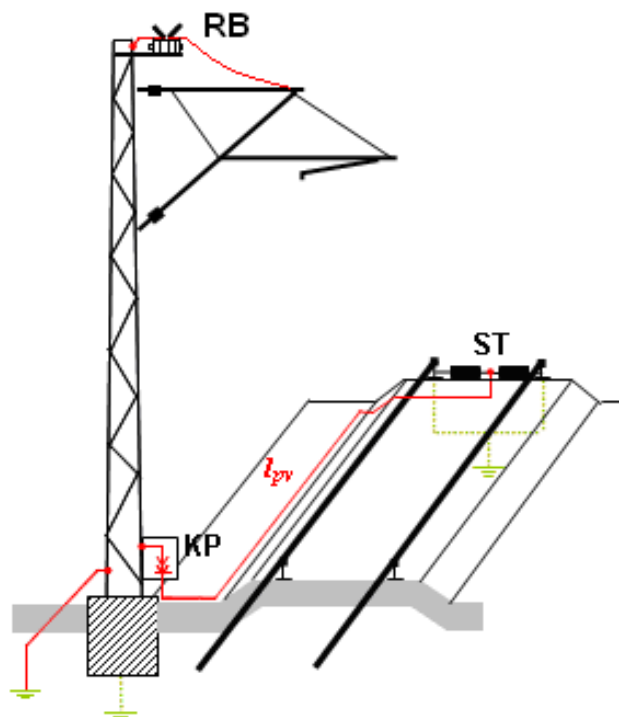
Následný zkratový proud v trakčním obvodu by se v místě bleskojistky rozdělil v poměru odporu uzemnění  $R_z = 10 \Omega$  a impedance zpětného vedení trakčního obvodu (kolejí), a to u trakční proudové soustavy 25 kV, 50 Hz přibližně v poměru 1:1, u soustavy 3 kV DC by se podstatná část zkratového proudu vracela do měničny koleje.

Umístění tlumivky na trakční stožár je sice technicky proveditelné, avšak při konstrukčním řešení musíme vzít v úvahu následující skutečnosti:

- při vypínání zkratového proudu dochází běžně k opakovanému zapnutí do zkratu. Tlumivka by proto musela být dimenzována na delší vypínací doby při zkratu a měla by větší rozměry
- kolejová průrazka by musela být od stožáru izolována
- napětí na tlumivce 20  $\mu\text{H}$  při úderu blesku (při impulsním proudu 5 kA/ $\mu\text{s}$ ) je více než 18 kV a při 10 kA/ $\mu\text{s}$  je 36 kV. To by znamenalo nárůst rozměrů tlumivky i její ceny

Stejného efektu však můžeme dosáhnout, jestliže tlumivku nahradíme příslušně prodlouženým propojovacím vodičem  $l_{pv}$ . Předpokládáme-li, že indukčnost 1 m vodiče o průměru 10 mm je cca 1  $\mu\text{H}$ , potom propojovací vodič o délce 30 m nahradí výše uvažovanou tlumivku. Stožáru lze využít jako svodového vodiče. Provedení je patrné z (Obrázek 15.).

Toto řešení je jednoduché a nevyžaduje žádných zvláštních úprav ani zvýšených nákladů. Jeho použití se předpokládá i v obvodu svodu od ventilové bleskojistky na primární straně staniční transformovny (u trakční soustavy AC 25 kV 50 Hz) a statického měniče DAK (u trakční soustavy DC 3 kV) pro napájení UNZ. [1]



Obrázek 15. Úprava svodu od trakčních bleskojistek

- RB* - růžková bleskojistka
- $l_{pv}$  - propojovací vodič
- KP* - kolejová průrazka,
- ST* - stykový transformátor

#### 4.1.2. Ukolejňovací vedení

Propojením staničních trakčních podpěr resp. bran vodičem, který je na jednom konci připojen přes kolejovou průrazku na střed stykového transformátoru nebo symetrizační tlumivky, vytvoříme z trakčních podpěr uzemňovací soustavu, jejíž zemní odpor bude mít velmi nízkou hodnotu, a vytvoříme tak příznivé podmínky pro rychlé svedení bleskového proudu do země. Tím zamezíme vniknutí nebezpečné části bleskového proudu do kolejových obvodů a následné ohrožení elektronické části stavědla.

Propojením soustavy staničních trakčních podpěr s uzemňovací soustavou výpravní budovy vytvoříme rovněž při úderu blesku podmínky pro vyrovnání potenciálu v celé stanici a zabráníme přenosu nebezpečných potenciálů v prostoru železniční stanice.

Převážná část staničních trakčních podpěr je na obou stranách kolejiště propojena vodivou konstrukcí bran, což umožňuje pospojovat ukolejňovacím vodičem trakční podpěry jen na jedné straně kolejiště. Na druhé straně kolejiště se připojí jen osamocené podpěry.

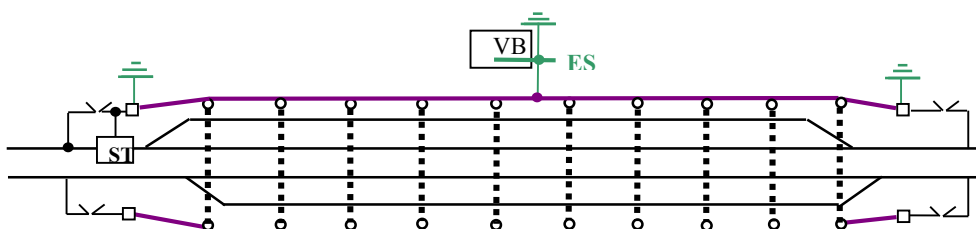
Připojení ukolejňovacího vodiče na zpětnou cestu trakčního proudu (kolej) lze provést dvojitým způsobem:

- jeden konec ukolejňovacího vodiče se připojí přes průřezku na střed stykového transformátoru, který je umístěn na staničních zhlavích
- ukolejňovací vodič se připojí na střed takzvané symetrizační tlumivky přibližně uprostřed délky ukolejňovacího vodiče. Tuto tlumivku, která byla vyvinuta v roce 2009, je možno umístit do kolejového obvodu, aniž by byla narušena jeho funkce

## 5. Výpočet podmínek činnosti uzemňovacího vedení při ochraně stavědel před účinky blesků

### 5.1. Ukolejňovací vedení na jednom konci připojené na kolejový obvod

V tomto případě je uzemňovací lano na jednom konci uzemněno na samostatný zemnič a připojeno přes průrazku na střed stykového transformátoru způsobem, který je zřejmý z (obrázek 15). V místech výpravní budovy se ukolejňovací vedení propojí s uzemňovací soustavou výpravní budovy (s ekvipotenciální sběrnicí). Ve stanici odpadne instalace kolejových průrazek na trakčních podpěrách, takže náklady na ukolejňovací vedení nebudou vysoké. Převážná část staničních trakčních podpěr je na obou stranách kolejiště propojena vodivou konstrukcí bran, což umožňuje pospojovat ukolejňovacím vodičem trakční podpěry jen na jedné straně kolejiště. Na druhé straně kolejiště se připojí jen osamocené podpěry.



Obrázek 16. Ukolejňovací vedení na jednom konci připojené na kolejový obvod

- ST* - stykový transformátor nebo symetrizační tlumivka  
*ES* - ekvipotenciální sběrnice

Podmínkou navrženého řešení však je zajištění spolehlivého odpojení při zkratu na trakčním vedení a splnění podmínky pro ochranu před úrazem elektrickým proudem. Rozhodujícím hlediskem pro navržené řešení je tedy dodržení dotykového napětí při zkratu na kterékoli trakční podpěře staniční soustavy. Přitom zkratové proudy na DC soustavě jsou mnohem vyšší než na soustavě AC. Dovolená dotyková napětí jsou závislá na době vypnutí a jsou stanovena v ČSN EN 50122-1 ed.2. Vypínací doby u soustavy AC

25 kV se pohybují okolo 100ms, u soustavy DC 3kV okolo hodnoty 50 ms. Rovněž zemní rezistivita základů podpěr dosahuje průměrných hodnot 20  $\Omega$  až 50  $\Omega$  a mění se v závislosti na ročním období. Objektivní zjištění dotykových napětí není proto úkolem snadným.

Pro výchozí posouzení napětí na trakčních podpěrách propojených ukolejňovacím vedením při zkratu bude proveden výpočet metodou článkového vedení, pomocí které zjistíme napětí na podpěrách proti vzdálené zemi při zkratu na konci vedení a na jeho začátku (v místě připojení na střed stykového transformátoru), Tyto dva krajní případy budou postačující pro posouzení napět'ových poměrů na jednotlivých stožárech. Grafickým vyjádřením průběhu napětí v místě zkratu bude možno stanovit přibližnou hodnotu nejvyššího dotykového napětí na trakční podpěře. [1]

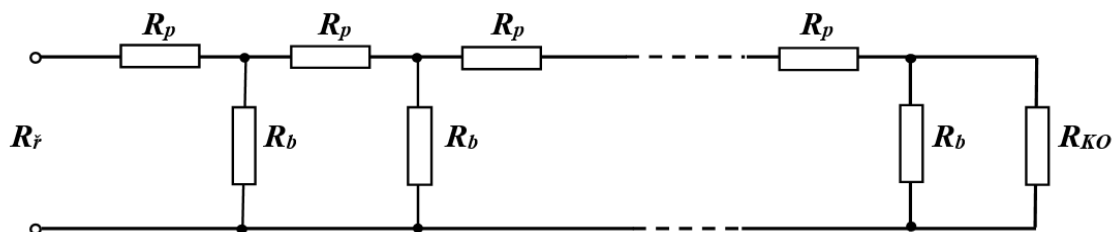
### 5.1.1. Trakční soustava DC

Pro oba krajní případy zkratu byly zvoleny následující základní parametry.

- délka ukolejňovacího vedení	$l = 1000 \text{ m}$
- počet bran	21
- počet polí	20
- vzdálenost mezi trakčními podpěrami	50 m
- průřez ukolejňovacích vodičů	$s = 120 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$
- rezistance ukolejňovacího vedení	$R_v = 0,145 \Omega$
- rezistance ukolejňovacího vedení na 1 T- článek	$R_p = 0,00729 \Omega$
- rezistance brány	$R_b = 10 \Omega$
- rezistance kolejového obvodu	$R_{KO} = 0,35 \Omega$
- zkratový proud	$I_k = 10000 \text{ A}$

Ukolejňovací vedení tvoří s trakčními branami a zemí takzvaný řetězový vodič, znázorněný na (Obrázek 17.), jehož výsledná rezistance na konci vedení je  $R_{\Sigma}$ , rezistance jednoho pole ukolejňovacího vedení (vzdálenost mezi dvěma sousedními branami) je  $R_p$  a zemní rezistance jedné brány je  $R_b$ . Vedení je na konci připojeno na kolejový obvod ( $R_{KO}$ ).





Obrázek 17. Řetězový vodič

### Zkrat na začátku vedení

Řetězový obvod můžeme nahradit řadou symetrických T-článků zakončených odporem kolejevého obvodu. Schéma zapojení je na (Obrázek 18.). Z teorie dvojbranu platí mezi napětími a proudy na vstupu (0) a výstupu (n) celého řetězu vztahy:

$$U_0 = A_n \cdot U_n + B_n \cdot I_n \quad (12)$$

$$I_0 = C_n \cdot U_n + A_n \cdot I_n \quad (13)$$

$A_n, B_n, C_n$  - Blondelovy konstanty

Blondelovy konstanty T-článku:

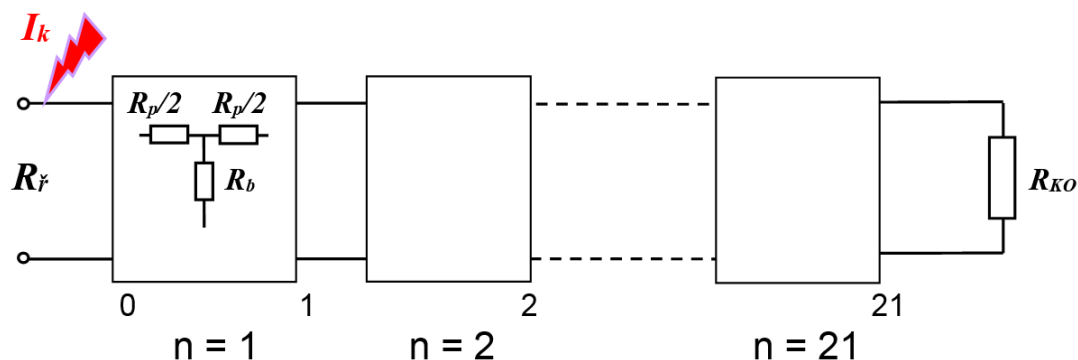
$$A_n = \cosh \gamma n \quad (14)$$

$$B_n = Z_v \cdot \sinh \gamma n \quad (15)$$

$$C_n = \frac{1}{Z_v} \cdot \sinh \gamma n \quad (16)$$

$\gamma$  - činitel šíření

$Z_v$  - vlnová rezistance



Obrázek 18. Náhradní schéma obvodu s T-články

vlnová rezistance v daných podmínkách:

$$Z_v = \sqrt{R_p \cdot R_b} \quad (17)$$

činitel šíření:

$$\gamma = \sqrt{\frac{R_p}{R_b}} \quad (18)$$

napětí na kolejovém obvodu  $R_{KO}$ :

$$U_n = I_n \cdot R_{KO} \quad (19)$$

dosadíme do rovnic (12 a 13) a obě rovnice vydělíme. Získáme tak rovnici pro výpočet řetězové rezistance obvodu na (obrázek 18.).

$$R_{\Sigma} = \frac{R_{KO} \cdot \cosh \gamma n + Z_v \cdot \sinh \gamma n}{\frac{R_{KO} \cdot \sinh \gamma n}{Z} \cdot \cosh \gamma n} \quad (20)$$

Průběh napětí na ukolejňovacím vedení získáme z rovnic (12 a 13) pro výpočet  $U_0$ , do které dosadíme proud  $I_n$ :

$$I_n = \frac{U_n}{R_{KO}} \quad (21)$$

Rovnice má po úpravě konečný tvar:

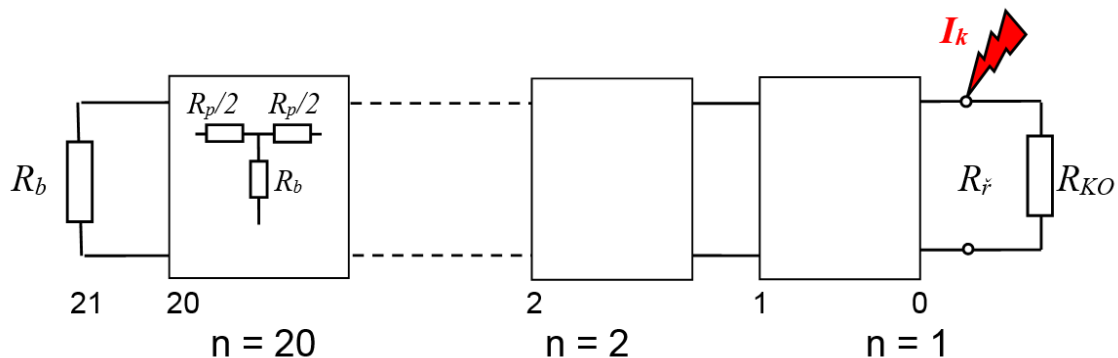
$$U_n = \frac{I_0 \cdot R_{\Sigma} \cdot R_{KO}}{R_{KO} \cdot \cosh \gamma n + Z_v \cdot \sinh \gamma n} \quad (22)$$

Za proud  $I_0$  dosadíme zkratový proud  $I_k$ .

Graf průběhu napětí při zkratu na začátku ukolejňovacího vedení je uveden v (Příloha 9.1.).

### Zkrat na konci vedení

Uspořádání řetězového vedení pro případ zkratu na konci ukolejňovacího vedení je uvedeno na (Obrázek 19.).



Obrázek 19. Náhradní schéma obvodu s T-články

Výpočet provedeme obdobným způsobem jako v předchozím případě. Napětí na poslední bráně od místa zkratu  $R_b$ :

$$U_n = I_n \cdot R_b \quad (23)$$

A odpovídající řetězová rezistance ukolejňovacího vedení od místa zkratu k začátku vedení má tvar:

$$R_{\check{r}} = \frac{R_b \cdot \cosh \gamma n + Z_v \cdot \sinh \gamma n}{\frac{R_b \cdot \sinh \gamma n}{Z} \cdot \cosh \gamma n} \quad (24)$$

Výsledná rezistance obvodu v místě zkratu:

$$R_v = \frac{R_{\check{r}} \cdot R_{kO}}{R_{\check{r}} + R_{kO}} \quad (25)$$

a napětí:

$$U_0 = I_0 \cdot \frac{R_{\check{r}} \cdot R_{kO}}{R_{\check{r}} + R_{kO}} \quad (26)$$

Rovnice (22) pro výpočet napětí na branách bude mít po dosazení napětí  $U_0$  a zkratového proudu  $I_k$  tvar:

$$U_n = \frac{I_0 \cdot R_f \cdot R_{KO} \cdot R_b}{(R_f + R_{KO}) \cdot (R_{KO} \cdot \cosh \gamma n + Z_v \cdot \sinh \gamma n)} \quad (27)$$

Graf průběhu napětí při zkratu na konci ukolejňovacího vedení je uveden v (Příloha 9.2.).

Průběh proudu lze vypočítat ze základních rovnic (12 a 13) pro výpočet  $I_0$ , do které dosadíme napětí  $U_n$  z rovnice (21).

Rovnice má konečný tvar:

$$I_n = \frac{I_0 \cdot Z_v}{R_{KO} \cdot \cosh \gamma n + Z_v \cdot \sinh \gamma n} \quad (28)$$

Za proud  $I_0$  dosadíme zkratový proud  $I_k$ .

Grafy průběhů zkratového proudu na začátku a na konci ukolejňovacího vedení jsou uvedeny v (Příloha 9.3. a Příloha 9.4.).

Z grafu můžeme zjistit, že proud protékající jednou branou do země se pohybuje okolo 150 - 200 A (rozdíl proudů v ukolejňovacím laně mezi dvěma branami). Část zkratového proudu, který protéká jednou trakční podpěrou do země je tedy přibližně 75 - 100 A.

Nižší hodnoty napětí a proudu oproti hodnotám při zkratu na začátku ukolejňovacího vedení vyplývají z nižšího výsledného odporu rezistance soustavy při zkratu na konci vedení a z rozdělení zkratového proudu v místě zkratu mezi rezistanci kolejevého obvodu a řetězový obvod trakčních podpěr a ukolejňovacího vedení. [1]

### 5.1.2. Trakční soustava AC

Výpočty byly provedeny stejným způsobem jako u trakční soustavy DC a pro oba krajní případy zkratu byly zvoleny následující parametry.

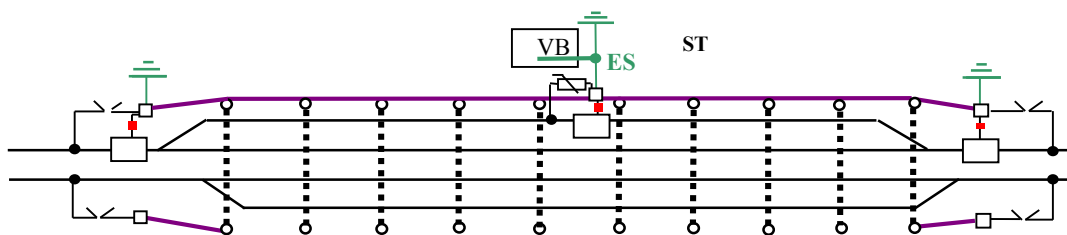
- délka ukolejňovacího vedení	$l = 1000 \text{ m}$
- počet bran	21
- počet polí	20
- vzdálenost mezi trakčními podpěrami	50 m
- průřez ukolejňovacích vodičů	$s = 2 \cdot 70 \text{ mm}^2 \text{ Fe}$
- rezistance ukolejňovacího vedení	$R_v = 1,02 \Omega$
- rezistance ukolejňovacího vedení na 1 T- článek	$R_p = 0,051 \Omega$
- rezistance brány	$R_b = 10 \Omega$
- rezistance kolejového obvodu	$R_{KO} = 0,35 \Omega$
- zkratový proud	$I_k = 3000 \text{ A}$

Grafy průběhů napětí při zkratu na začátku a na konci ukolejňovacího vedení a grafy průběhů zkratového proudu na začátku a na konci ukolejňovacího vedení jsou uvedeny v (Příloha 9.5., Příloha 9.6., Příloha 9.7., a Příloha 9.8.). [1]

### 5.2. Ukolejňovací vedení připojené na kolejový obvod uprostřed stanice

Jednodušším a účinnějším řešením problematiky popsané v předchozí části je připojení ukolejňovacího vedení na kolejový obvod uprostřed stanice, kde se obvykle nachází transformovna AC 25/0,4 kV 50 Hz (u trakční soustavy AC) resp. statický měnič DC 3/2×230 V (u trakční soustavy DC) pro napájení UNZ z trakčního vedení a výpravní budova se stavědlou ústřednou.

Toto řešení umožňuje symetrizační tlumivka zapojená mezi kolejnice kolejového obvodu, na jejíž střed se připojí ukolejňovací vedení. Využívání symetrizační tlumivky bylo schváleno SŽDC. Zapojení ochranné soustavy je schématicky znázorněno na (Obrázek 20.).



Obrázek 20. Ukolejňovací vedení připojené na kolejový obvod uprostřed stanic

Ukolejňovací vedení tvoří s trakčními branami a zemí takzvaný řetězový vodič, který rozdělíme na dva stejně dlouhé úseky. Rezistance jednoho pole ukolejňovacího vedení (vzdálenost mezi dvěma sousedními branami) je  $R_p$  a zemní rezistance jedné brány (základů dvou trakčních podpěr) je  $R_b$ . [1]

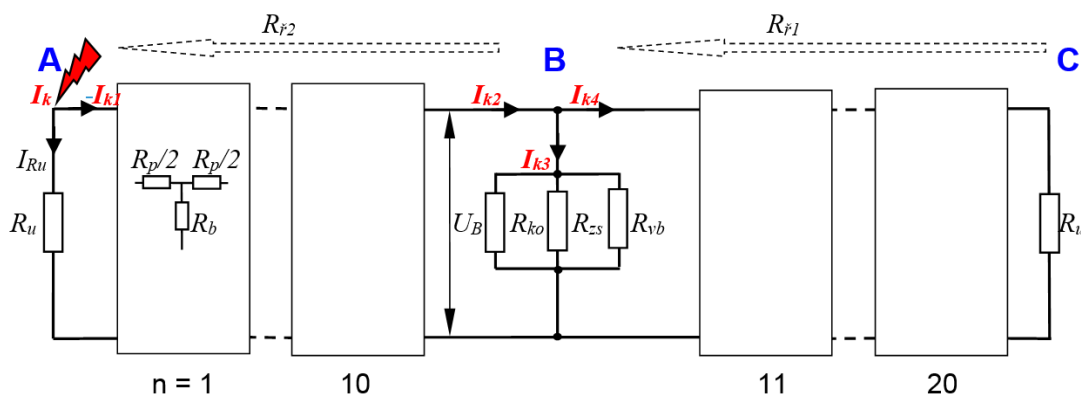
Vedení je uprostřed připojeno na kolejový obvod o rezistanci  $R_{KO}$ , na uzemnění stožáru staniční transformovny  $R_{ZS}$  a na uzemňovací soustavu VB o rezistanci  $R_{vb}$ . Na obou koncích vedení jsou koncové trakční podpěry připojeny na zemnič o rezistanci  $R_u$ .

### 5.2.1. Trakční soustava DC

#### Zkrat na jednom konci vedení

Obě části řetězového vodiče nahradíme řadou symetrických T-článků zakončených rezistancí základů koncových trakčních podpěr  $R_u$ . Schéma zapojení je na (Obrázek 21.).

- délka ukolejňovacího vedení	$l = 1000 \text{ m}$
- počet bran	21
- počet polí	20
- vzdálenost mezi trakčními podpěrami	50 m
- průřez ukolejňovacích vodičů	$s = 120 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$
- rezistance ukolejňovacího vedení	$R_v = 0,145 \Omega$
- rezistance ukolejňovacího vedení na 1 T- článek	$R_p = 0,00729 \Omega$
- rezistance brány	$R_b = 10 \Omega$
- rezistance kolejového obvodu	$R_{KO} = 0,35 \Omega$
- rezistance základu transformovny 25/0,4 kV	$R_{ZS} = 20 \Omega$
- rezistance uzemnění VB	$R_{vb} = 5 \Omega$
- rezistance uzemnění trakčních podpěr	$R_u = 10 \Omega$
- zkratový proud	$I_k = 10000 \text{ A}$



Obrázek 21. Náhradní zapojení obvodu s T-články

Pro rychlejší pochopení jednotlivých kroků je v tomto případě proveden podrobnější výpočet. Pro stanovení rezistance celého vedení při zkratu v místě „A“ postupujeme od konce vedení (místo „C“).

Nejprve vypočteme podle vztahu (29) řetězovou rezistanci pravé části vedení:

$$R_{f1} = \frac{R_u \cdot \cosh \gamma n + Z_v \cdot \sinh \gamma n}{\frac{R_u \cdot \sinh \gamma n}{Z} \cdot \cosh \gamma n} \quad (29)$$

Její hodnota v místě „B“ je:

$$R_{f1} = 0,94 \Omega$$

Nyní zjistíme výslednou rezistanci všech paralelně zapojených uzemnění v místě „B“, která je dána rovnicí:

$$R_{v1} = \frac{R_{KO} \cdot R_s \cdot R_{vb} \cdot R_{f1}}{R_s \cdot R_{vb} \cdot R_{f1} + R_{KO} \cdot R_{vb} \cdot R_{f1} + R_{KO} \cdot R_s \cdot R_{f1} + R_{KO} \cdot R_s \cdot R_{vb}} \quad (30)$$

Dosazením příslušných hodnot je výsledná rezistance v místě „B“:

$$R_{v1} = 0,248 \Omega$$

Tuto hodnotu  $R_{v1}$  dosadíme do rovnice (29) a získáme řetězovou rezistanci v místě „A“, která je:

$$R_{\check{r}2} = 0,264 \Omega$$

Výsledná rezistance vedení v místě „A“ je:

$$R_{v2} = \frac{R_u \cdot R_{\check{r}2}}{R_u + R_{\check{r}2}} \quad (31)$$

Dosazením příslušných hodnot do rovnice (32) zjistíme průběh napětí na ukolejňovacím vedení mezi body „A“ a „B“ a současně i napětí  $U_B$  v místě „B“:

$$R_{\check{r}1} = \frac{I_k \cdot R_{v2} \cdot R_{v1}}{R_{v1} \cdot \cosh \gamma n + Z_v \cdot \sinh \gamma n} \quad (32)$$

Pomocí tohoto napětí snadno zjistíme rozdělení proudů v místě „B“ a tedy i proud  $I_{k4}$ , který dosadíme do rovnice (33):

$$R_{\check{r}1} = \frac{I_{k4} \cdot R_{v2} \cdot R_{v1}}{R_u \cdot \cosh \gamma n + Z_v \cdot \sinh \gamma n} \quad (33)$$

Do této rovnice dosadíme současně řetězovou rezistanci  $R_{\check{r}1}$  a rezistanci koncové trakční podpěry  $R_u$ . Tím získáme průběh napětí na ukolejňovacím vedení mezi body „B“ a „C“. Průběh napětí na celé délce vedení je patrný z grafu v (Příloha 9.9.)

Výpočet průběhu proudu provedeme obdobným způsobem jako v předchozí části. Rozdíl je v tom, že v případě ukolejnění uprostřed vedení a zkratu na jednom konci vedení musíme provést výpočet pro obě části vedení zvlášť. K výpočtu použijeme tedy vztahu (28), do kterého dosadíme zkratový proud na začátku vedení pro zjištění průběhu proudu mezi body „A“ a „B“ a zkratový proud vstupující do úseku „B“ - „C“ pro zjištění průběhu proudu mezi body „B“ a „C“. Je třeba si též uvědomit, že část zkratového proudu ( $I_{Ru}$ ) v místě „A“ unikne do země přes rezistanci základu koncové podpěry a strojený zemnič. Tento vliv byl při výpočtu zkratu v soustavě DC zanedbán, protože na výsledné rozložení napětí na vedení nemá podstatný vliv. Uprostřed vedení odtéká část zkratového proudu  $I_{k3}$  do kolejového obvodu, základu trakční podpěry a uzemňovací soustavy výpravní



budovy, daný napětím  $U_B$  a výslednou rezistancí  $R_B$  v místě „B“. Výsledná rezistance v místě „B“ je:

$$R_B = \frac{R_{KO} \cdot R_S \cdot R_{vb}}{R_S \cdot R_{vb} + R_{KO} \cdot R_{vb} + R_{KO} \cdot R_S} \quad (34)$$

Dosazením příslušných hodnot zjistíme, že:

$$R_B = 0,332 \, \Omega$$

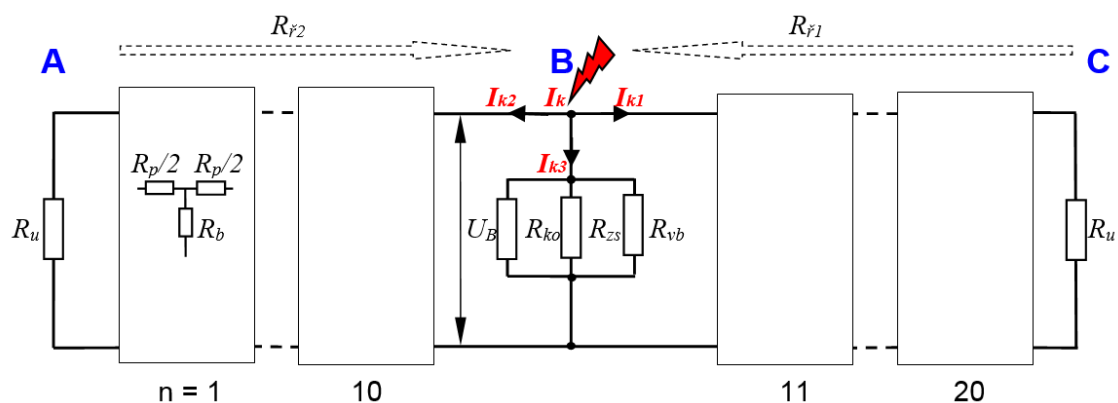
Část zkratového proudu, odtékající z vedení v místě „B“:

$$I_{k3} = \frac{U_B}{R_B} = \frac{1874}{0,322} = 5820 \, A \quad (35)$$

Grafické vyjádření výsledků výpočtu průběhu proudu v ukolejňovacím vedení pro případ zkratu na jednom konci ukolejňovacího vedení je v (Příloha 9.10.). [3]

### Zkrat uprostřed vedení

Náhradní schéma ukolejňovacího vedení při zkratu v místě připojení na kolejový obvod (uprostřed stanice) je na (Obrázek 22.). Vstupní údaje pro výpočet jsou stejné jako při zkratu na začátku vedení. Při výpočtu postupujeme následujícím způsobem. Řetězovou rezistancí pravé části vedení jsme zjistili při předchozím výpočtu. Její hodnota v místě „B“ je  $R_{\tilde{r}1} = 0,94 \, \Omega$ .



Obrázek 22. Náhradní zapojení s T-články

Vycházíme-li z předpokladu, že ukolejňovací vedení je připojeno na kolejový obvod uprostřed železniční stanice, potom řetězové rezistance pravé a levé části vedení v místě „B“ jsou stejné:

$$R_{\check{r}1} = R_{\check{r}2} \quad (36)$$

Známa je rovněž hodnota rezistance v místě „B“:

$$R_B = 0,322 \Omega$$

Výsledná řetězová rezistance v místě „B“ je:

$$R_{\check{r}} = \frac{R_{\check{r}1}}{2} = 0,47 \Omega$$

Výsledná rezistance  $R_v$  v místě „B“ (včetně řetězové rezistance) je:

$$R_v = \frac{R_B \cdot R_{\check{r}}}{R_B + R_{\check{r}}} \quad (37)$$

Dosažením příslušných hodnot získáme:

$$R_v = 0,19 \Omega$$

Napětí v místě „B“ je z Ohmova zákona:

$$U_B = I_K \cdot R_v = 1900 V \quad (38)$$

Výpočet průběhu proudu provedeme stejným způsobem jako při zkratu na začátku vedení, tj. použijeme vztahu (28). V tomto případě budou hodnoty zkratového proudu v obou polovinách ukolejňovacího vedení stejné. Uprostřed vedení odtéká část zkratového proudu do kolejového obvodu, základu trakční podpěry a uzemňovací soustavy výpravní budovy. Tato část zkratového proudu je daná napětím  $U_B$  a výslednou rezistancí  $R_B$  v místě „B“:

$$I_{k3} = \frac{U_B}{R_B} = \frac{1900}{0,322} = 5930 A \quad (39)$$

Grafické vyjádření výsledků výpočtu průběhu napětí v ukolejňovacím vedení pro případ zkratu uprostřed ukolejňovacího vedení je v (Příloha 9.11.) a průběhu proudu je v (Příloha 9.12.) [3]

## **5.2.2. Trakční soustava AC**

Výpočet byl proveden stejným způsobem a se stejným zadáním jako u vedení AC na jednom konci připojeném na kolejový obvod. Výsledky výpočtu jsou v grafickém vyjádření v (Příloha 9.13., Příloha 9.14., Příloha 9.15., Příloha 9.16.). Při výpočtu byl brán v úvahu vliv koncového stožáru se strojeným zemničem  $10 \Omega$ . Je však zřejmé, že napětí na začátku vedení (v místě zkratu) to v daném případě nijak výrazně neovlivní.

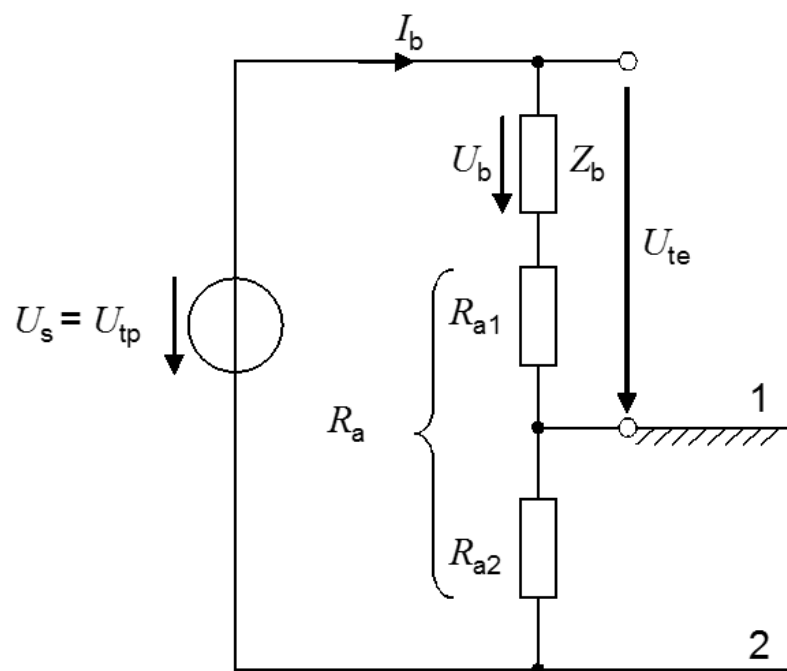
## **5.3. Dotykové napětí**

### **5.3.1. Ochrana proti nebezpečným dotykovým napětím**

Pro dosažení ochrany před úrazem elektrickým proudem v trakčních soustavách je upřednostňován způsob ochrany spojením neživých částí (zařízení v kolejišti a součástí systému trakčního vedení) se zpětným vedením (v podmínkách SŽDC spojením s kolejemi), které je využito pro vedení poruchového proudu a zajišťuje automatické odpojení od napájení.

Protože u trakční soustavy DC 3 kV je napájení traťového úseku oboustranné, musí být při zkratu zajištěno odpojení v obou sousedních měnících. To umožňuje takzvaná vazba napáječů, která v případě zkratu zajistí vypnutí chráněného úseku ze všech stran.

Neživé části trakčního a netrakčního napájení, které jsou umístěné uvnitř oblasti trolejového vedení nebo pantografové oblasti, takzvaného prostoru ohrožení trolejovým vedením (POTV), a které nejsou izolovány od země, nesmí být přímo připojeny ke zpětnému obvodu z důvodu korozivních účinků vlivem působení bludných proudů, viz ČSN EN 50122-2 ed.2.



Obrázek 23. Náhradní schéma obvodu pro stanovení dotykového napětí

- 1 - stanoviště
- 2 - zem
- $U_s$  - zdroj napětí
- $U_{tp}$  - předpokládané dotykové napětí
- $U_{te}$  - dovolené dotykové napětí
- $U_b$  - tělesné napětí
- $I_s$  - proud tělem
- $Z_b$  - celková impedance těla
- $R_{a1}$  - předřadný odpor pro boty
- $R_{a2}$  - předřadný odpor stanoviště
- $R_{a2}$  -  $\rho_s \cdot 1,5 \text{ m}^{-1}$
- $\rho_s$  - předřadný odpor stanoviště ( $\Omega\text{m}$ )
- $U_{tp,max}(t) = U_{te,max}(t) + I_b(t) \cdot R_{a2}$

Připojení ke zpětnému vedení musí být provedeno přes zařízení omezující napětí (kolejové průrazky), které při nedovolených hodnotách dotykových napětí zajistí průchod proudu z neživých částí do zpětného vedení a následné přerušení proudu v krátkém čase, čímž udržují napětí na hodnotách stanovených v ČSN EN 50122-1 ed.2.

Tato evropská norma rozlišuje dvě kategorie nebezpečných napětí:

- napětí tělesné ( $U_b$ )
- napětí dotykové ( $U_{te}$ )

podle náhradního schématu na obrázku 23.

Mezní hodnoty tělesných a dotykových napětí požadované evropskou normou ČSN EN 50122-1 ed.2 jsou uvedeny v (Tabulka 1. a Tabulka 2.). Nelze-li tyto hodnoty dodržet, musí být provedeno některé z následujících opatření:

- zvýšení vodivosti zpětné cesty trakčního proudu,
- izolování okolí stožáru (např. živice, šterk apod.),
- zřízení ekvipotenciálních kruhů,
- znemožnění přístupu zábranou [1]

<b>t</b>	<b><math>U_{b, max}</math></b>
<b>(s)</b>	<b>(V)</b>
> 300	120
300	150
1	160
0,9	165
0,8	170
0,7	175
0,6	180
0,5	190
0,4	205
0,3	220
0,2	245
0,1	285
0,05	325
0,02	370

Tabulka 1. Dovolena tělesná napětí (DC 3 kV)

$t$  - doba trvání

$U_{b, max}$  - dovolené tělesné napětí

<b>t</b>	<b><math>U_{te, max}</math></b>	
	<b>dlouhá doba trvání</b>	<b>krátká doba trvání</b>
<b>[s]</b>	<b>[V]</b>	<b>[V]</b>
> 300	120	-
300	150	-
1	160	-
0,9	165	-
0,8	170	-
0,7	175	-
< 0,7	-	350
0,6	-	360
0,5	-	385
0,4	-	420
0,3	-	460
0,2	-	520
0,1	-	625
0,05	-	735
0,02	-	870

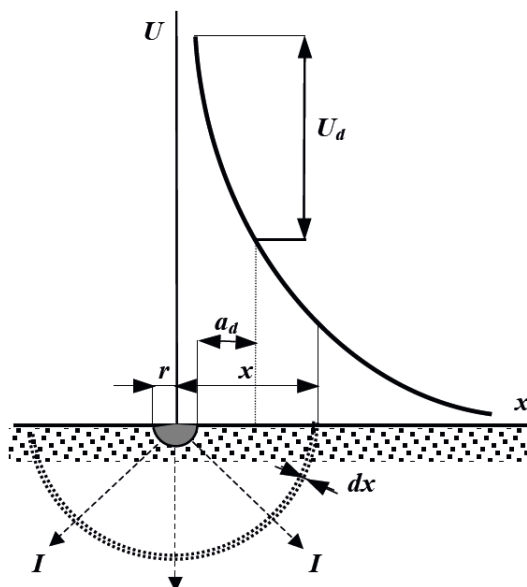
Tabulka 2. Dovolena dotyková napětí (DC 3 kV)

$t$  - doba trvání

$U_{b,max}$  - dovolené dotyková napětí

### 5.3.2. Rozložení povrchového potenciálu

Rozložení povrchového potenciálu v okolí uzemňovací elektrody lze odvodit pomocí modelu polokoule zapuštěné v zemi. Předpokládáme, že uzemňovací proud teče touto elektrodou radiálně do země a že povrch koule a půlkulové průřezy země jsou ekvipotenciálami, a proud tedy protéká kolmo na tyto plochy. Model je znázorněn na (Obrázek 24.).



Obrázek 24. Průběh potenciálu na povrchu země při pomyslné uzemňovací elektrodě tvaru polokoule

- $r$  - poloměr elektrody
- $x$  - vzdálenost od středu elektrody
- $a_d$  - dotykové vzdálenosti
- $U_d$  - dotykové napětí

Za těchto podmínek a při konstantní rezistivitě půdy  $\rho$  je odpor polokoule o tloušťce  $dx$  a poloměru  $x$  možno vyjádřit vztahem:

$$dR = \frac{\rho}{2\pi \cdot x^2} dx \quad (40)$$

Integrací rovnice (41) získáme vztah pro výpočet rezistance elektrody tvaru polokoule:

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \int_r^\infty \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi \cdot r} \quad (41)$$

Potenciál jakéhokoli bodu ve vzdálenosti  $x$  od středu uzemňovací elektrody, kterou protéká proud  $I$ , lze tedy obecně definovat rovnicí:

$$U_x = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot x} \quad (42)$$

- $\rho$  - je rezistivita země

Potenciál na uzemňovací elektrodě je:

$$U_e = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot r} \quad (43)$$

$r$  - je poloměr uzemňovací elektrody

Maximální hodnota tohoto potenciálu je v případě trakční soustavu AC při připojení na kolejový obvod uprostřed ukolejnovacího vedení.

$$U_e = 1086 \text{ V} \quad (\text{efektivní hodnota napětí při zkratu na začátku vedení})$$

Pro grafické vyjádření průběhu potenciálu upravíme rovnici (44) na tvar:

$$U_e \cdot r = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} = U_x \cdot x \quad (44)$$

z čehož vyplývá vztah:

$$U_x = U_e \frac{r}{x} \quad (45)$$

$r$  - 0,15 m

$x$  - 0,15 až 3 m

Průběh potenciálu je uveden v grafu v (Příloha 9.17.).

### 5.3.3. Výpočet dotykového napětí

Pro výpočet dotykového napětí, tj. napětí mezi dlaní a chodidlem osoby, která se dotýká elektrody nebo vodivé části s ní spojené, platí vztah:

$$U_d = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left( \frac{1}{x} - \frac{1}{x+a_d} \right) \quad (46)$$

$x = r$  - 0,15 m

$a_d$  - 1 m



Rovnici (46) upravíme na tvar:

$$U_d = U_{ef} \cdot r \left( \frac{1}{x} - \frac{1}{x+a_d} \right) \quad (47)$$

$U_{ef}$  - efektivní hodnota napětí:  $U_{ef1} = 1086 \text{ V}$

$a_d$  - 1 m

Dosažením těchto hodnot do rovnice 48) získáme dotyková napětí:

$$U_{d1} = 163 \left( \frac{1}{15} - \frac{1}{15+1} \right) = 938 \text{ V} \quad (48)$$

Při porovnání vypočtené hodnoty dotykového napětí s hodnotami předepsanými ČSN EN 50122-1 ed. 2, zjistíme, že při vypínacím čase 100 ms je u trakční soustavy AC dovolená hodnota dotykového napětí 785 V.

Výpočet, který je třeba považovat za orientační, nám přibližuje danou problematiku a ukazuje, v jakých mezích se pohybují kritické hodnoty dotykových napětí při zvolených předpokladech. Výrazného zlepšení poměrů na ukolejňovacím vedení by bylo možno dosáhnout u obou trakčních soustav připojením středu ukolejňovacího vedení na symetrizační tlumivku a obou konců vedení na stykové transformátory. Toto řešení je předmětem současného studia možností realizace použitím ukolejňovací tlumivky vřazené mezi kolejovou průrazku a střed symetrizační tlumivky resp. střed stykového transformátoru. U trakční soustavy AC 25 kV je řešení s připojením na kolejový obvod uprostřed vedení reálné za předpokladu použití měděných vodičů 2x50 mm<sup>2</sup>. Tato možnost však byla odmítnuta s ohledem na nebezpečí krádeže. [1]

## 6. Porovnání výsledků výpočtu s měřením na modelu

V této části jsem vytvořil model. K vytvoření tohoto modelu jsem použil program Wolfram Mathematica. Při vytváření modelu jsem vycházel z předchozí části. Kde jsem vše počítal pro určité podmínky. V mém modelu je možno nastavit tyto vstupní parametry. A model následně vypočte pro zadané podmínky napětí a proudy.

Vstupní parametry modelu, které mohu nastavovat:

- délka ukolejňovacího vedení	l (m)
- počet bran	pbran (-)
- rezistance ukolejňovacího vedení na 1 T- článek	Rp ( $\Omega$ )
- rezistance brány	Rb ( $\Omega$ )
- rezistance kolejového obvodu	RKO ( $\Omega$ )
- rezistance základu transformovny	Rzs ( $\Omega$ )
- rezistance uzemnění VB	Rvb ( $\Omega$ )
- rezistance uzemnění trakčních podpěr	Ru ( $\Omega$ )
- zkratový proud	ik (A)
- ukolejňovací vedení připojené na kolejový obvod na jednom konci	konec (0-vyp./1-zap.)
- ukolejňovací vedení připojené na kolejový obvod uprostřed	stred (0-vyp./1-zap.)
- zkrat na začátku vedení	zstart (0-vyp./1-zap.)
- zkrat na konci vedení	zkonec (0-vyp./1-zap.)
- zkrat uprostřed vedení	zstred (0-vyp./1-zap.)

Vstupní parametry konec, střed, zstart, zkonec a zstred mohou nabývat jen hodnot „0“ a „1“. Jsou to logické proměnné, které určují místo napájení a místo zkratu.

Dle zvolených vstupních parametrů model následně vypočte napětí a proudy na každé bráně. A také jejich průběhy znázorní v grafech a vynese do tabulky. Pokud jsou vstupní parametry modelu zadány špatně, tak se objeví hláška indikující chybu. Dle typu

textu chybné hlášky je pak možno špatný vstupní parametr změnit a vypočítat vše správně. Pokud je ale vše zadáno správně, tak model vypočítá výsledky.

Vstupní parametry nesmí být nulové ani záporné. Pokud jsou zadány záporné nebo nulové hodnoty, výstup z modelu vypíše chybovou hlášku, která oznámí, jaký vstupní parametr byl zadán špatně.

### **Příklad**

Zde je uveden příklad pro trakční soustavu DC. Ukolejňovací vedení je připojeno na kolejový obvod uprostřed stanice. A zkrat je také uprostřed stanice. Příklad je uveden pro následující parametry:

- délka ukolejňovacího vedení	1000 m
- počet bran	21
- rezistance ukolejňovacího vedení na 1 T- článek	0,00729 $\Omega$
- rezistance brány	10 $\Omega$
- rezistance kolejového obvodu	0,05 $\Omega$
- rezistance základu transformovny	20 $\Omega$
- rezistance uzemnění VB	5 $\Omega$
- rezistance uzemnění trakčních podpěr	10 $\Omega$
- zkratový proud	10000 A
- ukolejňovací vedení připojené na kolejový obvod na jednom konci	0
- ukolejňovací vedení připojené na kolejový obvod uprostřed	1
- zkrat na začátku vedení	0
- zkrat na konci vedení	0
- zkrat uprostřed vedení	1

Model je přiložen na CD společně s diplomovou prací.

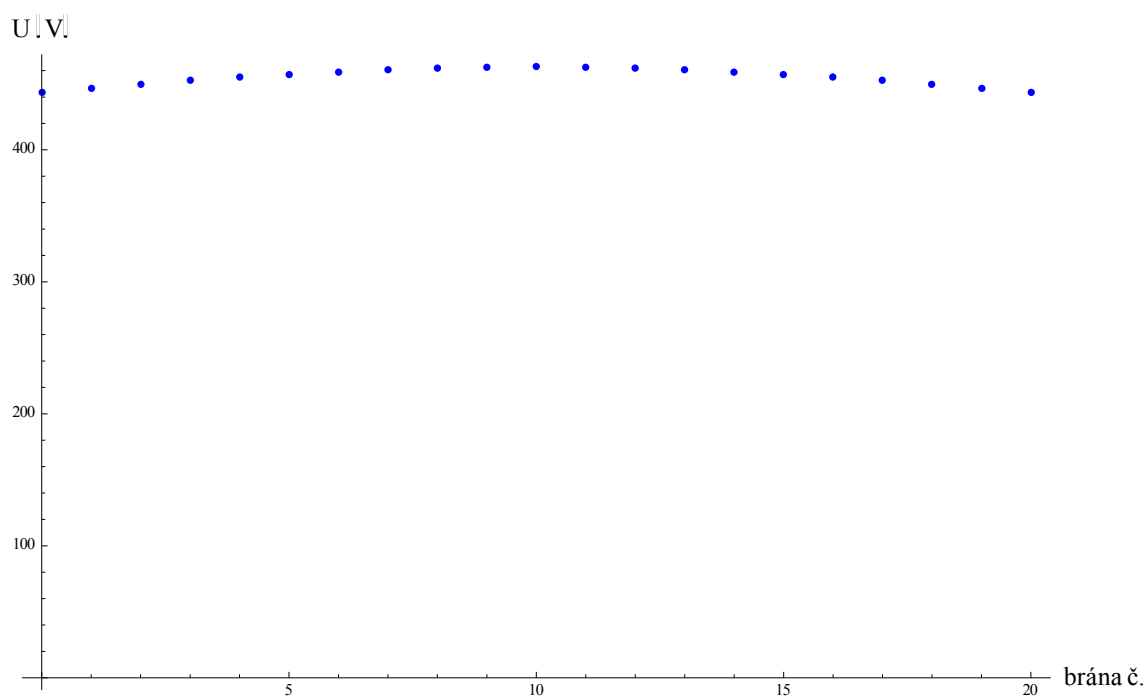
Po zadání vstupních parametrů nám model vypočte následující hodnoty proudů a napětí (Tabulka 3.):

<b>b.č.</b>	<b>U (V)</b>	<b>I (A)</b>
1	443.527	44.3527
2	446.846	48.9118
3	449.885	54.4714
4	452.633	61.4063
5	455.081	70.306
6	457.22	82.1526
7	459.044	98.714
8	460.545	123.526
9	461.718	164.838
10	462.559	247.397
11	463.064	494.914
12	462.559	247.397
13	461.718	164.838
14	460.545	123.526
15	459.044	98.714
16	457.22	82.1526
17	455.081	70.306
18	452.633	61.4063
19	449.885	54.4714
20	446.846	48.9118
21	443.527	44.3527

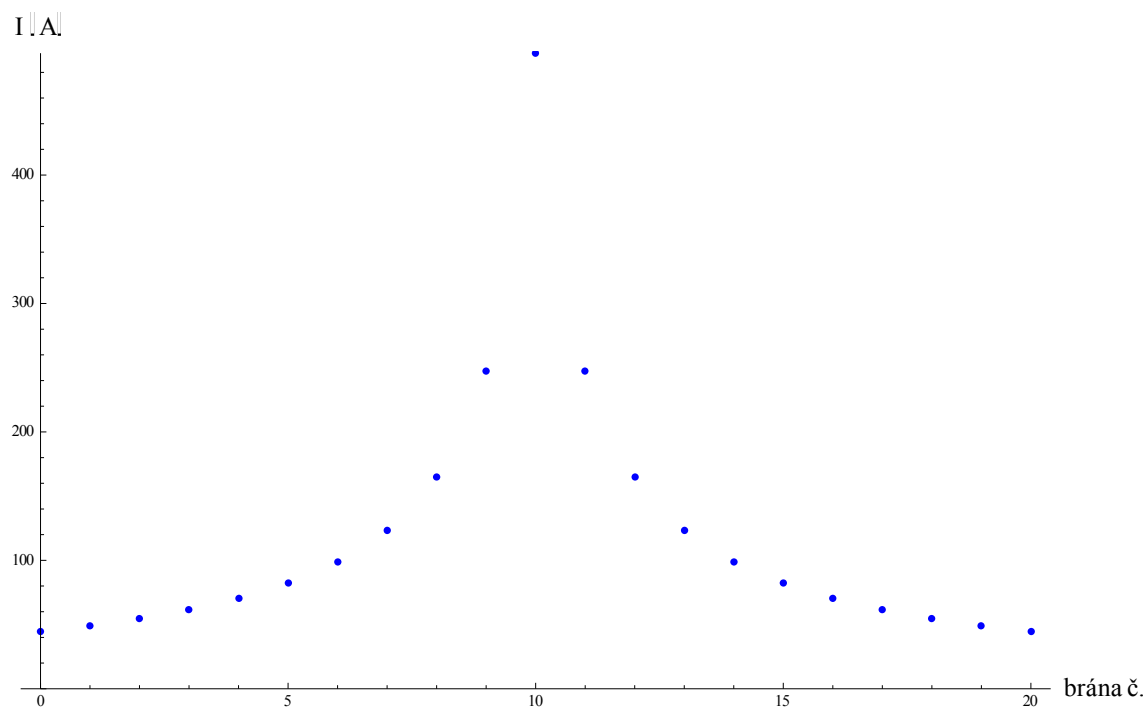
Tabulka 3. Hodnoty napětí a proudů na branách

A vynesete následující grafy:

Průběh napětí:



Průběh proudu:



## 7. Vyhodnocení a závěrečná doporučení

Systém trakčního obvodu u obou trakčních soustav a dvoupásové kolejové obvody neumožňují zejména ve stanicích účinně chránit elektronickou zabezpečovací techniku proti účinkům blesků.

Důvodem je skutečnost, že zpětnou cestu trakčního obvodu tvoří pouze kolej a zem. Při úderu blesku do soustavy trakčního vedení (troleje nebo nosné konstrukce) se podstatná část bleskového impulzu dostane prostřednictvím kolejových průrazek do kolejového obvodu a následně může způsobit značné škody na elektronickém vybavení stavědla.

Určitého zlepšení lze dosáhnout úpravou svodů od trakčních bleskojistek, které uchrání elektronické stavědlo při úderu blesku do trakčního vedení zejména v blízkosti staničních zhlaví.

Na volné trati a uvnitř stanic však při úderu blesku do troleje obvykle dojde k přeskokům na izolátoru a k vniknutí bleskového proudu přes trakční podpěru a kolejovou průrazku do kolejového obvodu. Stejný efekt způsobí i úder do trakční podpěry. To pak může způsobit škody na elektronické části přejezdových zařízení. Ukolejňovací vedení zavěšené na trakčních podpěrách ve stanici podstatně snižuje nebezpečný účinek blesků na elektronickou část stavědla.

Řešení by umožnilo připojování ukolejňovacího vedení na středy symetrizačních tlumivek a stykových transformátorů na vzdálenost cca 500 m. Pro tento účel byly vyvinuty takzvané ukolejňovací tlumivky, jejichž spolehlivost však musí být vyzkoušena v provozu.

## 8. Literatura

- [ 1 ] Verzich, V.: Koexistence trakčního obvodu a systému elektronického stavědla na elektrizovaných tratích SŽDC, Reportér AŽD Praha, 2013.
- [ 2 ] Verzich, V.: Ochrana železničních elektrizovaných stavědel a přejezdových zařízení před účinky blesku, Reportér AŽD Praha, 2007.
- [ 3 ] Verzich, V.: Spolehlivost k vyšší bezpečnosti železniční dopravy, Reportér AŽD Praha 3/2013, 2007.
- [ 4 ] Verzich, V.: Napájecí systém pro železniční zabezpečovací zařízení, TÚČD
- [ 5 ] Verzich, V.: Ochrana vnějších prvků zabezpečovacího zařízení proti účinkům blesků, NŽT 6/2008
- [ 6 ] Hlava, K.: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení, Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2004
- [ 7 ] Pantůček, E.: Ochrana před bleskem, Elektrotechnika v praxi, září, říjen, 2002
- [ 8 ] Verzich, V.: Ochrana elektronických zabezpečovacích zařízení provozovaných na tratích ČD před účinky blesků, Nová železniční technika, 3/2003

### Použitý software

Wolfram Mathematica®9

Verze: 9.0.0.0, Platforma: Microsoft Windows (64-bit)

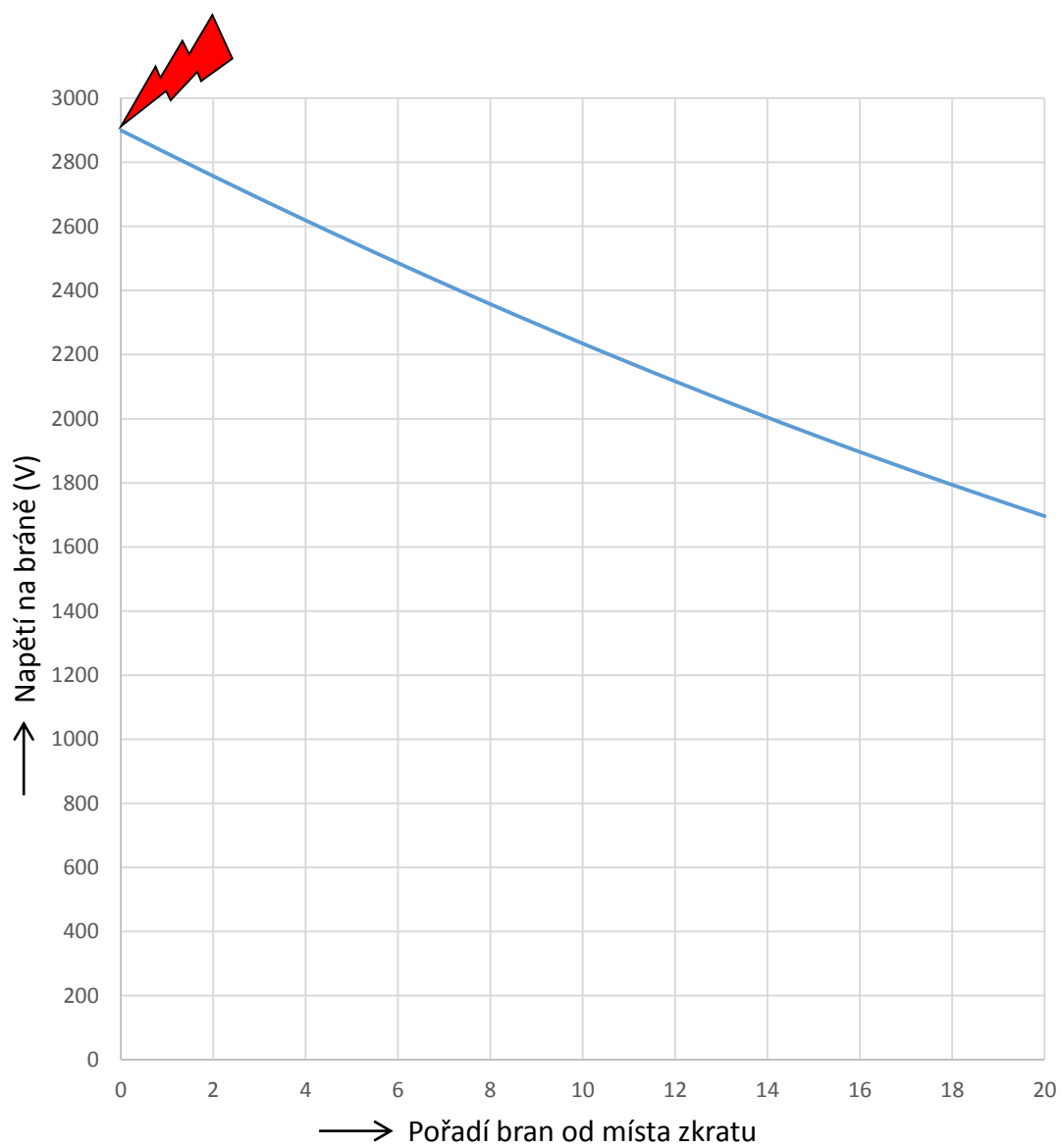
## 9. Přílohy

### Seznam příloh

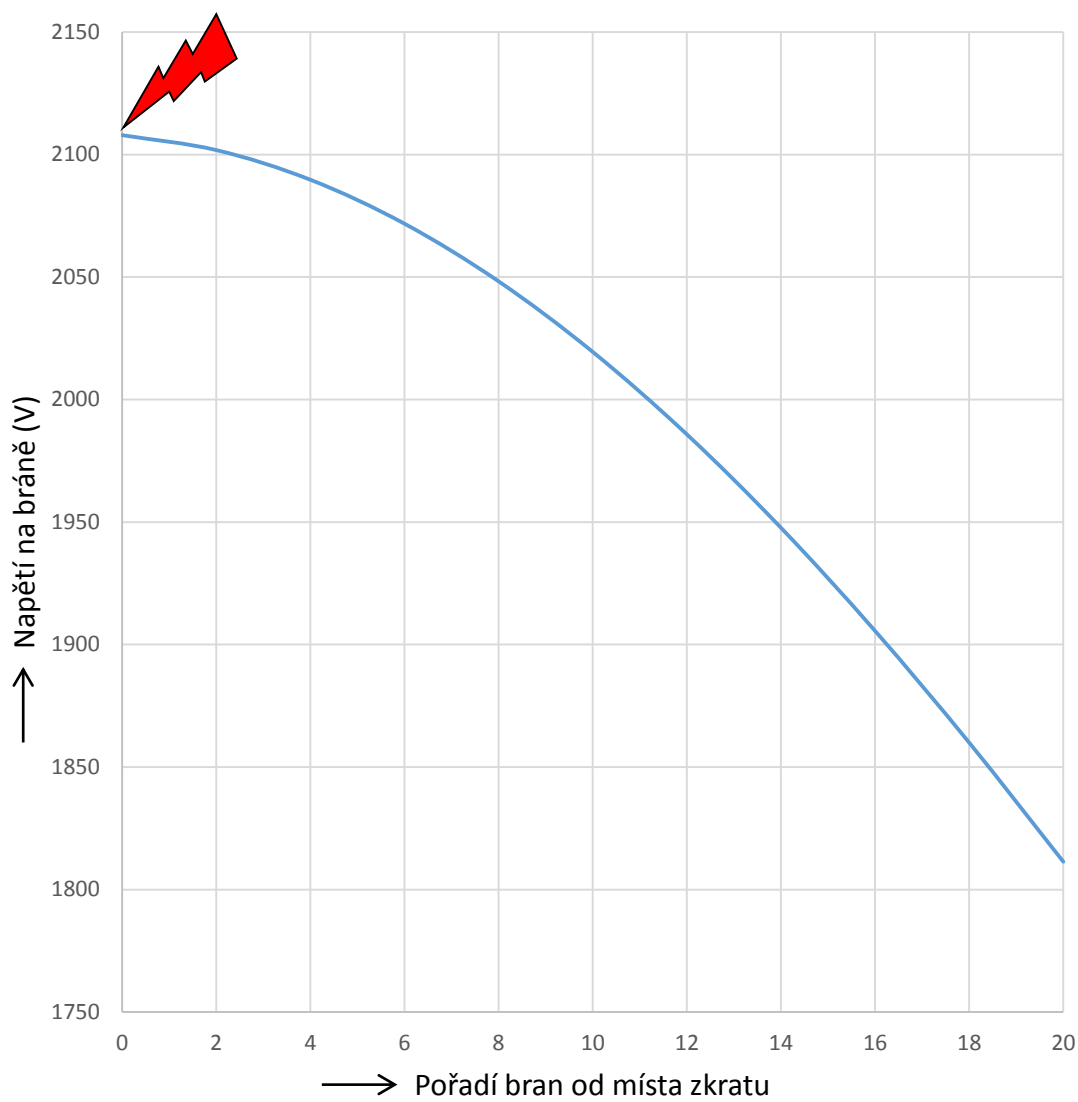
9.1.	DC soustava, průběh napětí při zkratu na začátku ukolejňovacího vedení.....	65
9.2.	DC soustava, průběh napětí při zkratu na konci ukolejňovacího vedení.....	66
9.3.	DC soustava, průběh zkratového proudu na začátku ukolejňovacího vedení.....	67
9.4.	DC soustava, průběh zkratového proudu na konci ukolejňovacího vedení.....	68
9.5.	AC soustava, průběh napětí při zkratu na začátku ukolejňovacího vedení.....	69
9.6.	AC soustava, průběh napětí při zkratu na konci ukolejňovacího vedení.....	70
9.7.	AC soustava, průběh zkratového proudu na začátku ukolejňovacího vedení.....	71
9.8.	AC soustava, průběh zkratového proudu na konci ukolejňovacího vedení.....	72
9.9.	DC soustava, průběh napětí při zkratu na jednom konci ukolejňovacího vedení.....	73
9.10.	DC soustava, průběh proudu při zkratu na jednom konci ukolejňovacího vedení.....	74
9.11.	DC soustava, průběh napětí při zkratu uprostřed ukolejňovacího vedení.....	75
9.12.	DC soustava, průběh napětí při zkratu uprostřed ukolejňovacího vedení.....	76
9.13.	AC soustava, průběh napětí při zkratu na jednom konci ukolejňovacího vedení.....	77
9.14.	AC soustava, průběh proudu při zkratu na jednom konci ukolejňovacího vedení.....	78
9.15.	AC soustava, průběh napětí při zkratu uprostřed ukolejňovacího vedení.....	79
9.16.	AC soustava, průběh proudu při zkratu uprostřed ukolejňovacího vedení.....	80
9.17.	Vyjádření průběhu povrchového potenciálu.....	81



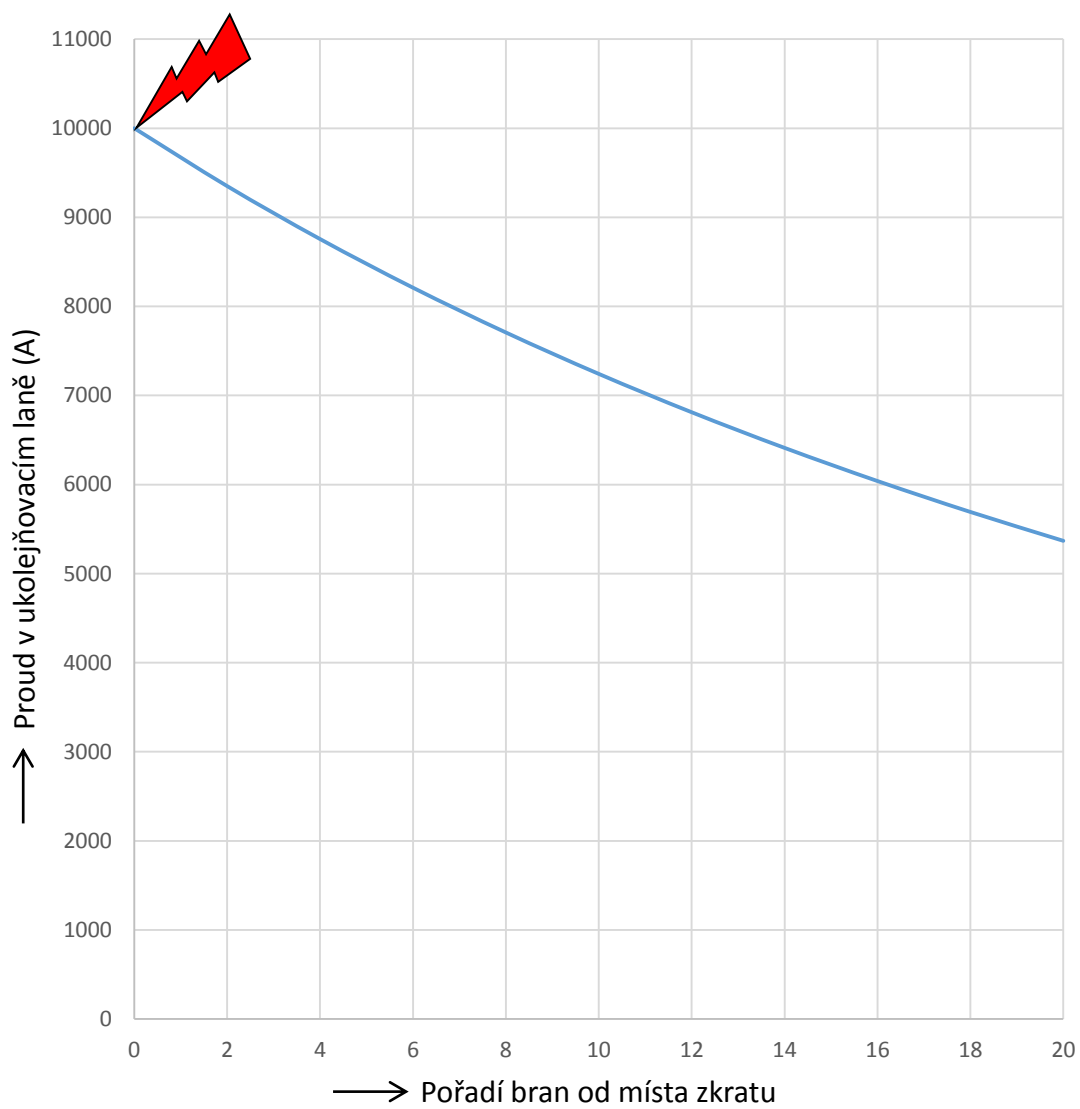
## 9.1. DC soustava, průběh napětí při zkratu na začátku ukolejňovacího vedení



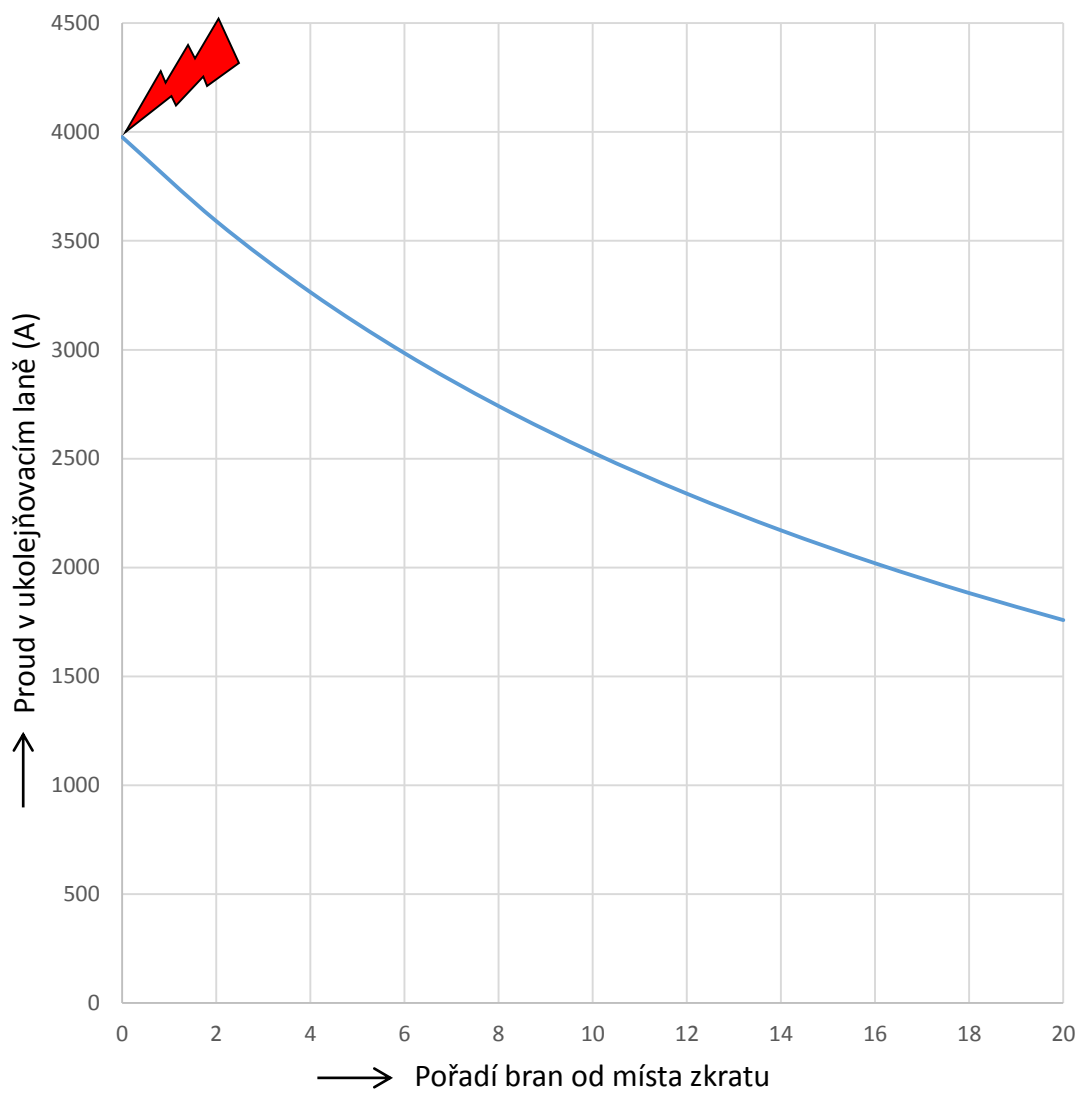
## 9.2. DC soustava, průběh napětí při zkratu na konci ukolejňovacího vedení



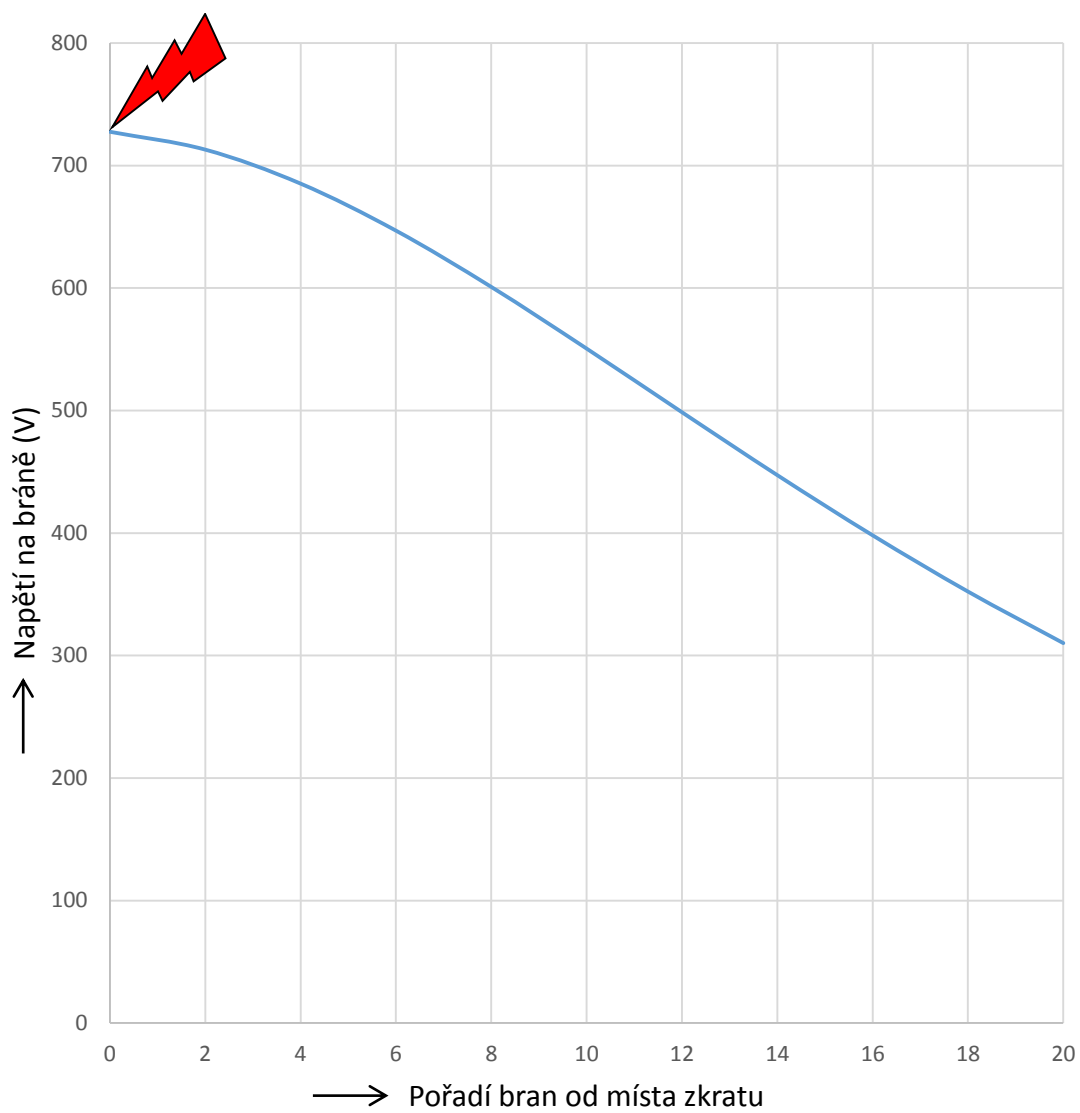
### 9.3. DC soustava, průběh zkratového proudu na začátku ukolejňovacího vedení



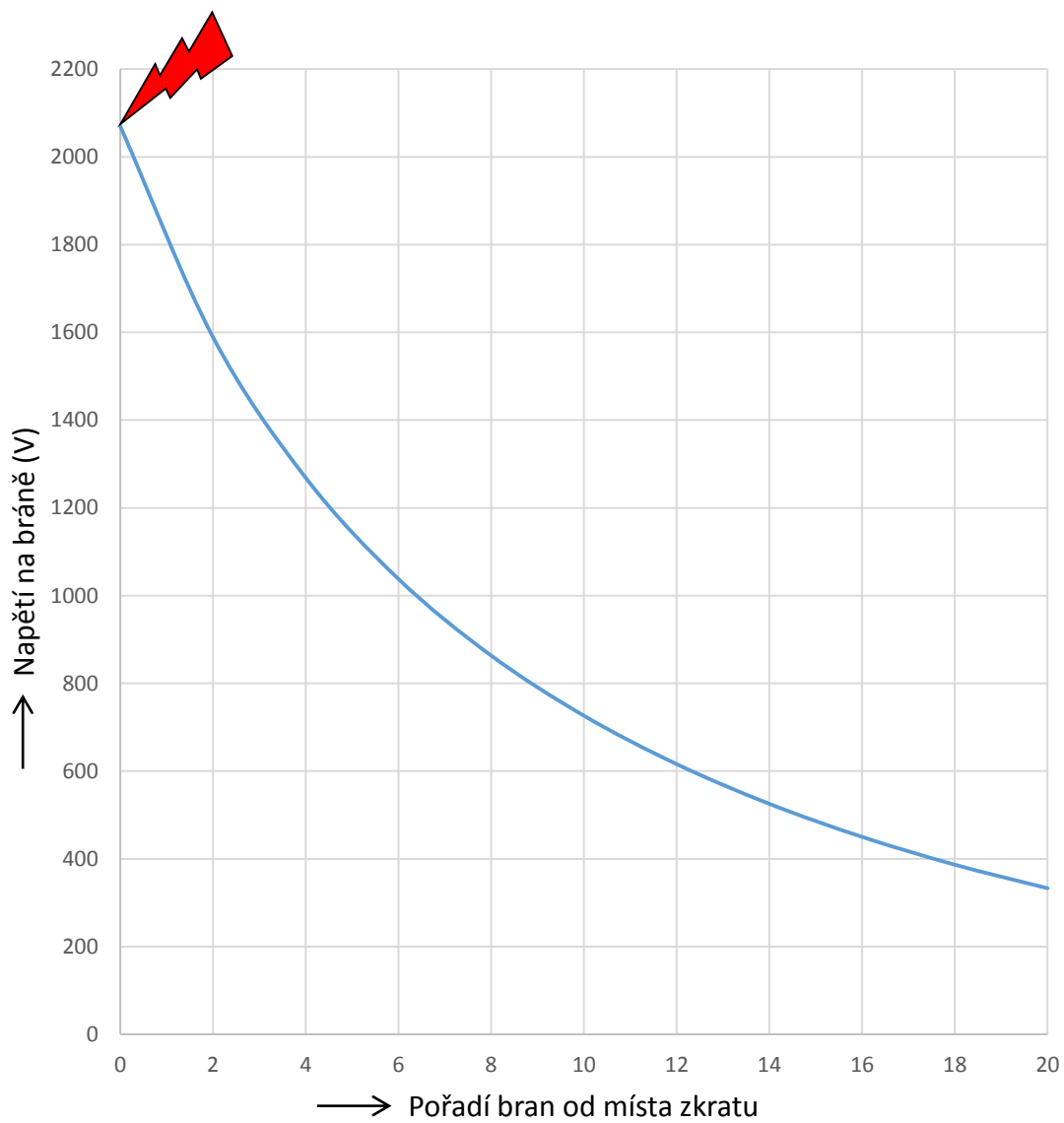
## 9.4. DC soustava, průběh zkratového proudu na konci ukolejňovacího vedení



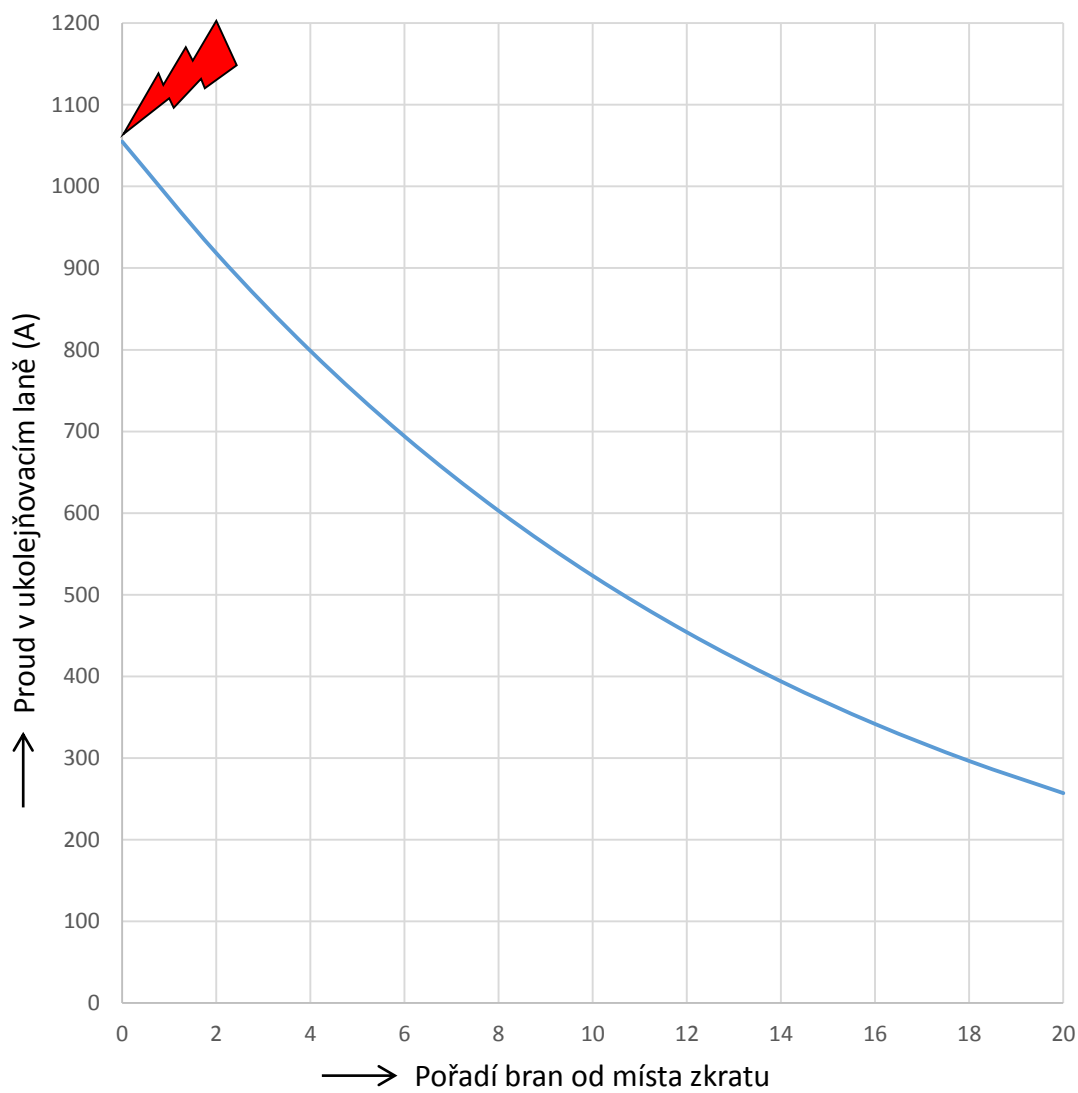
## 9.5. AC soustava, průběh napětí při zkratu na začátku ukolejňovacího vedení



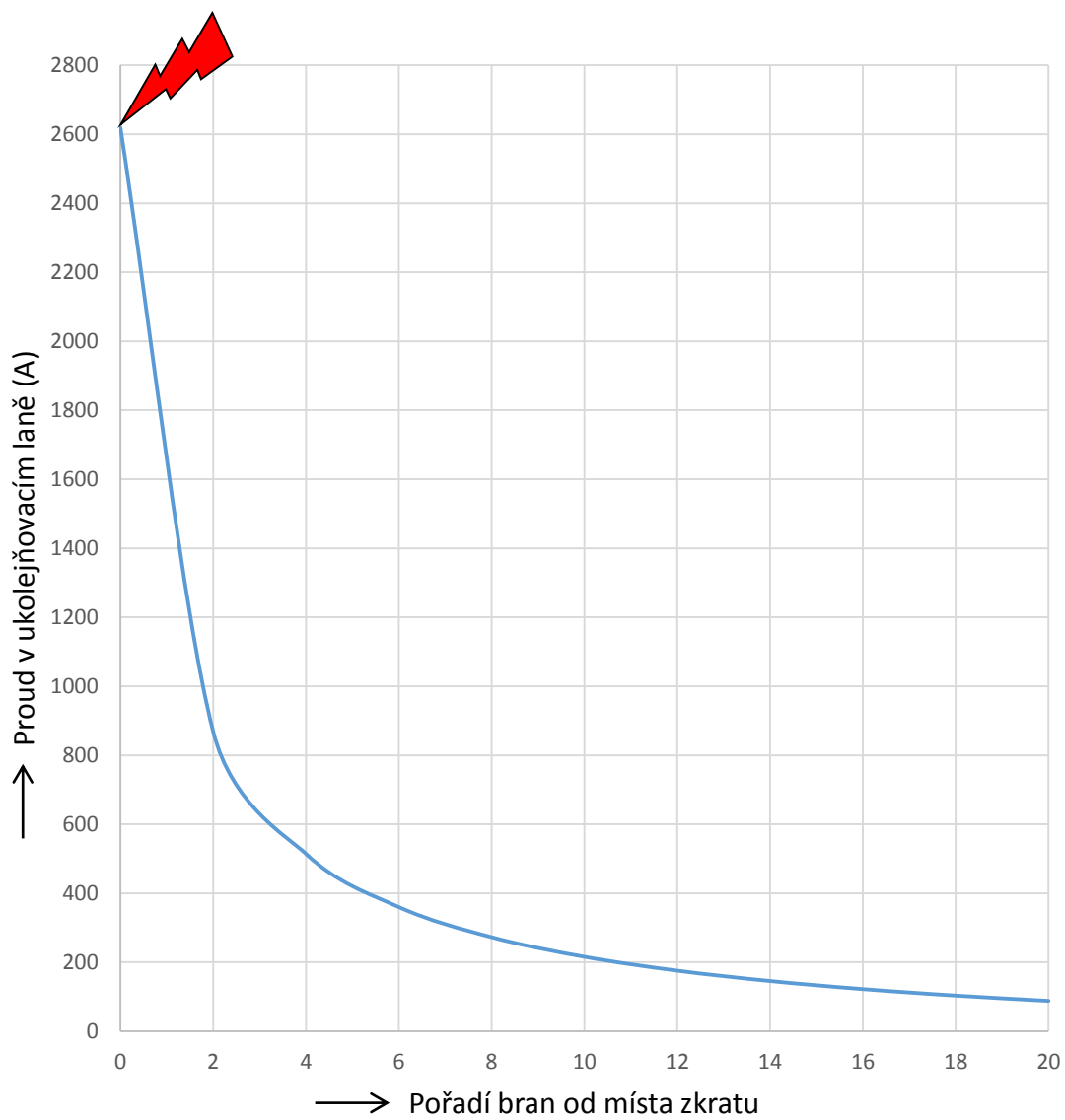
## 9.6. AC soustava, průběh napětí při zkratu na konci ukolejňovacího vedení



## 9.7. AC soustava, průběh zkratového proudu na začátku ukolejňovacího vedení

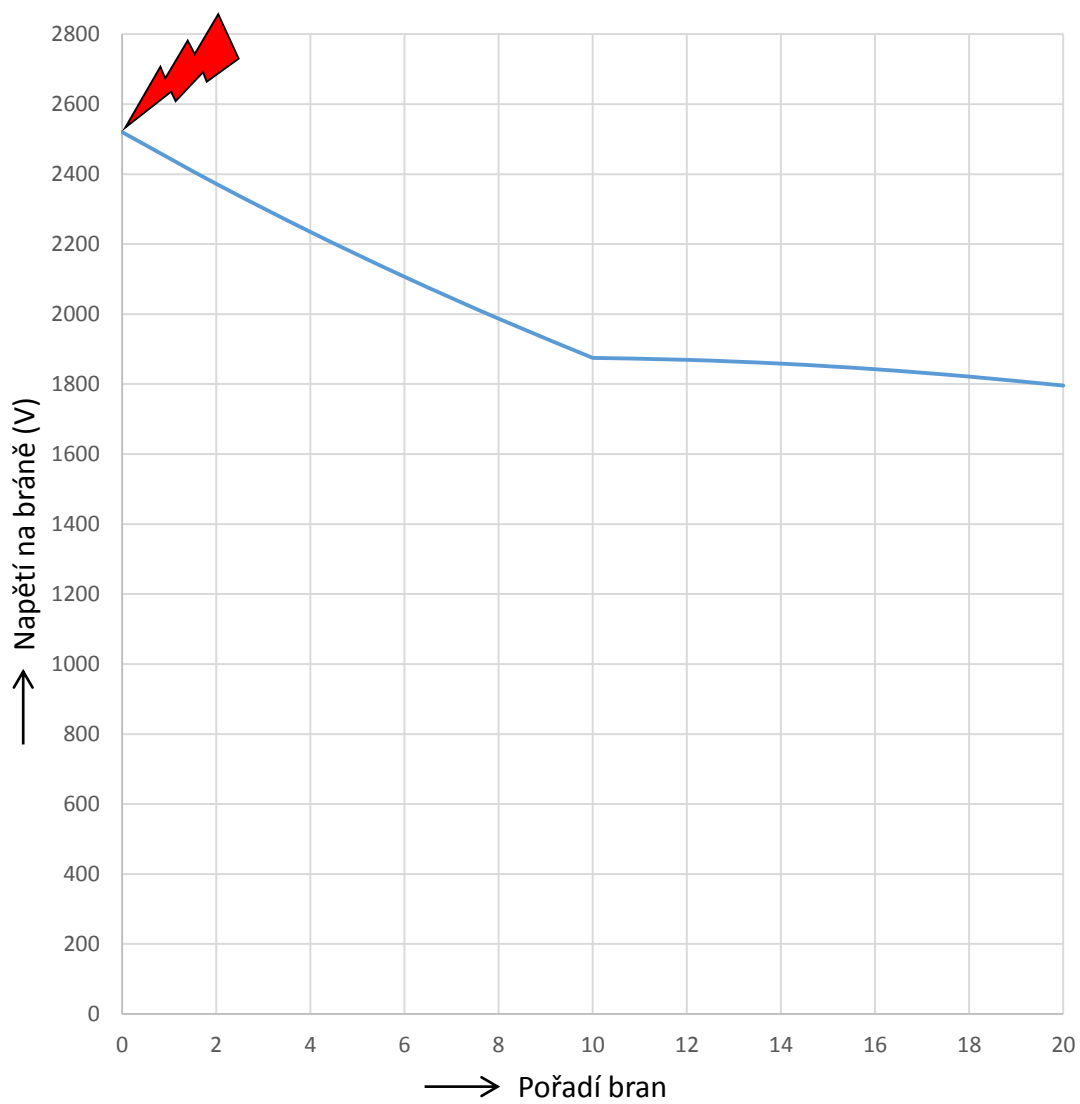


## 9.8. AC soustava, průběh zkratového proudu na konci ukolejňovacího vedení

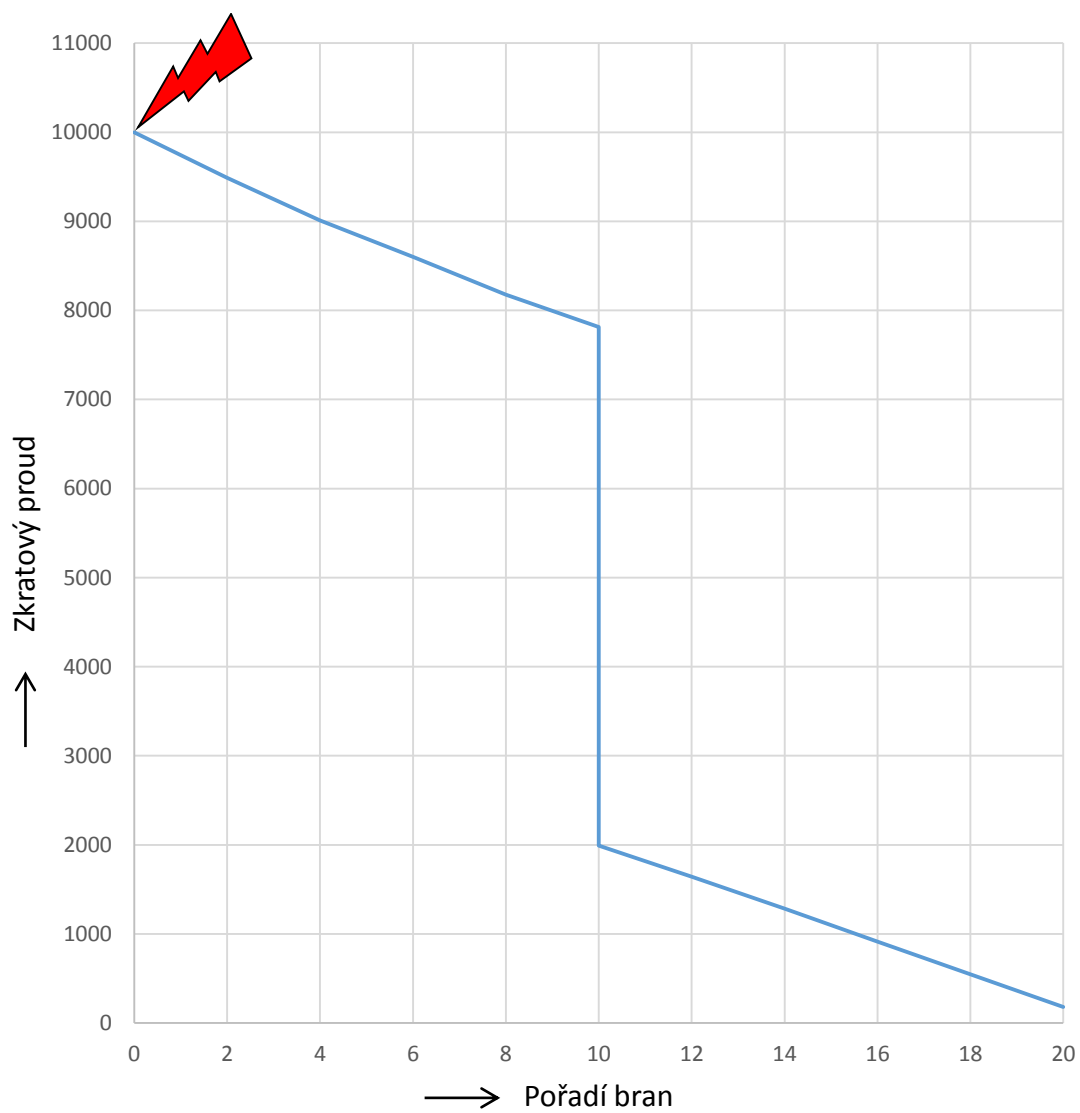




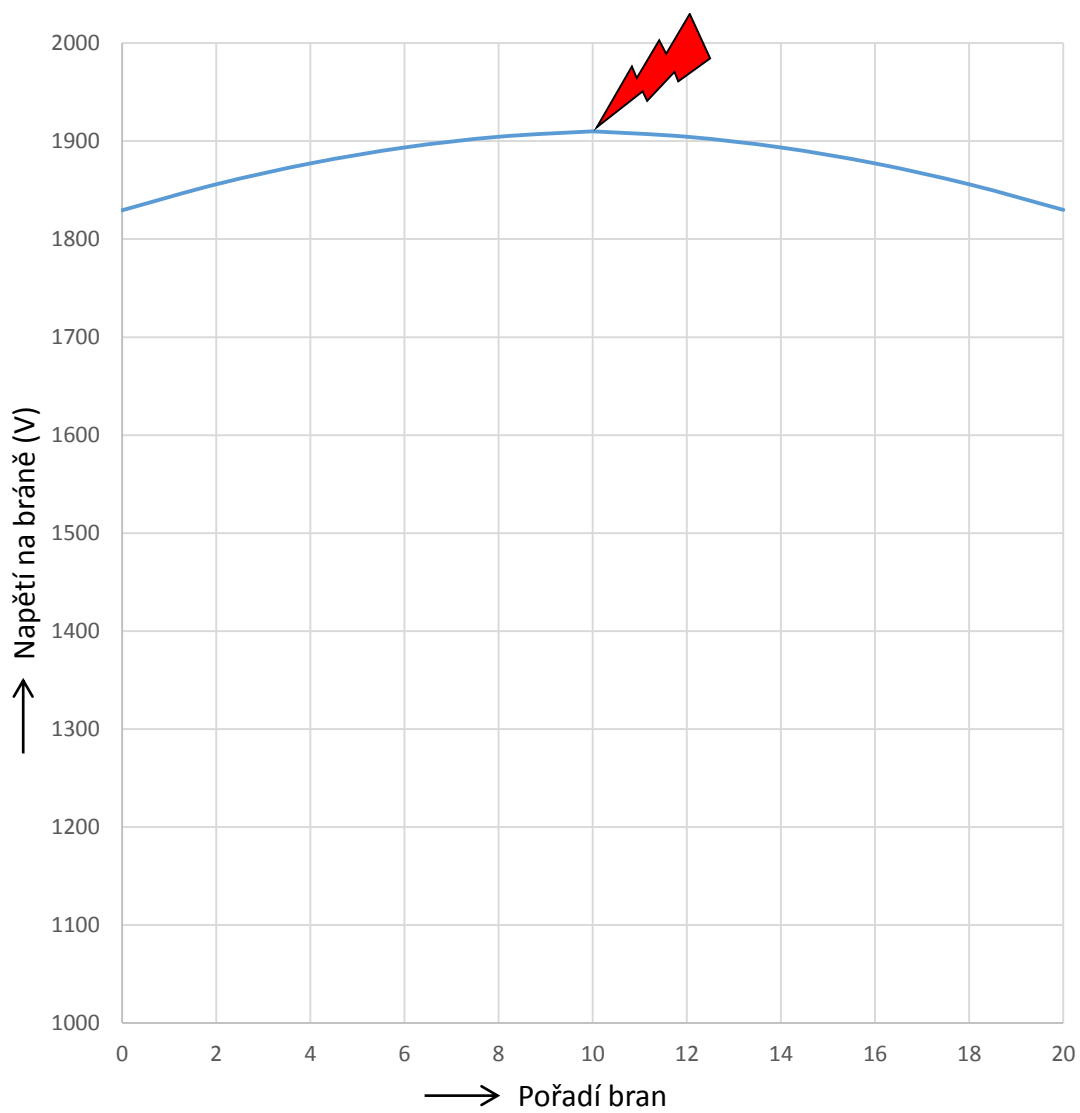
## 9.9. DC soustava, průběh napětí při zkratu na jednom konci ukolejňovacího vedení



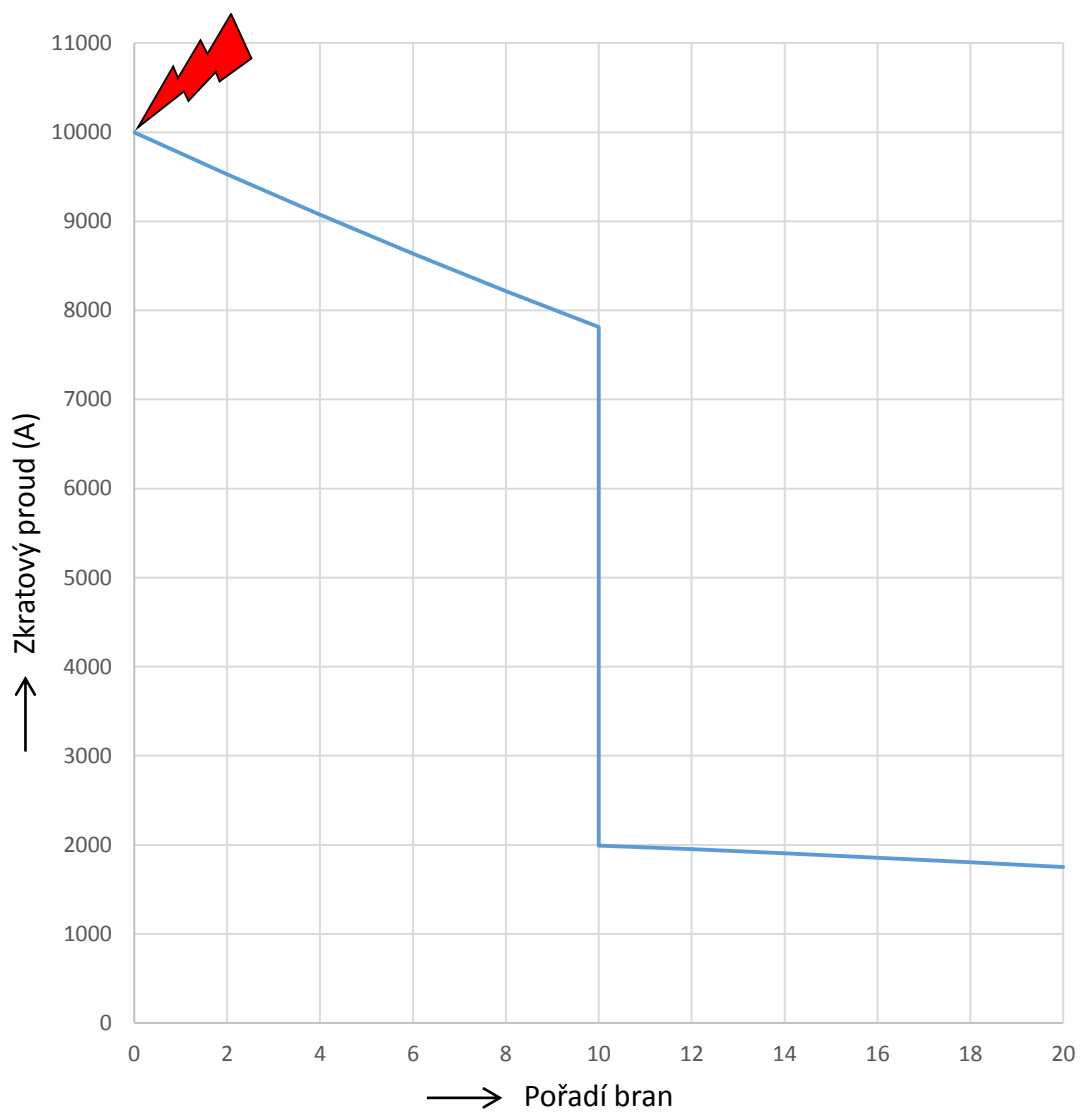
## 9.10.DC soustava, průběh proudu při zkratu na jednom konci ukolejňovacího vedení



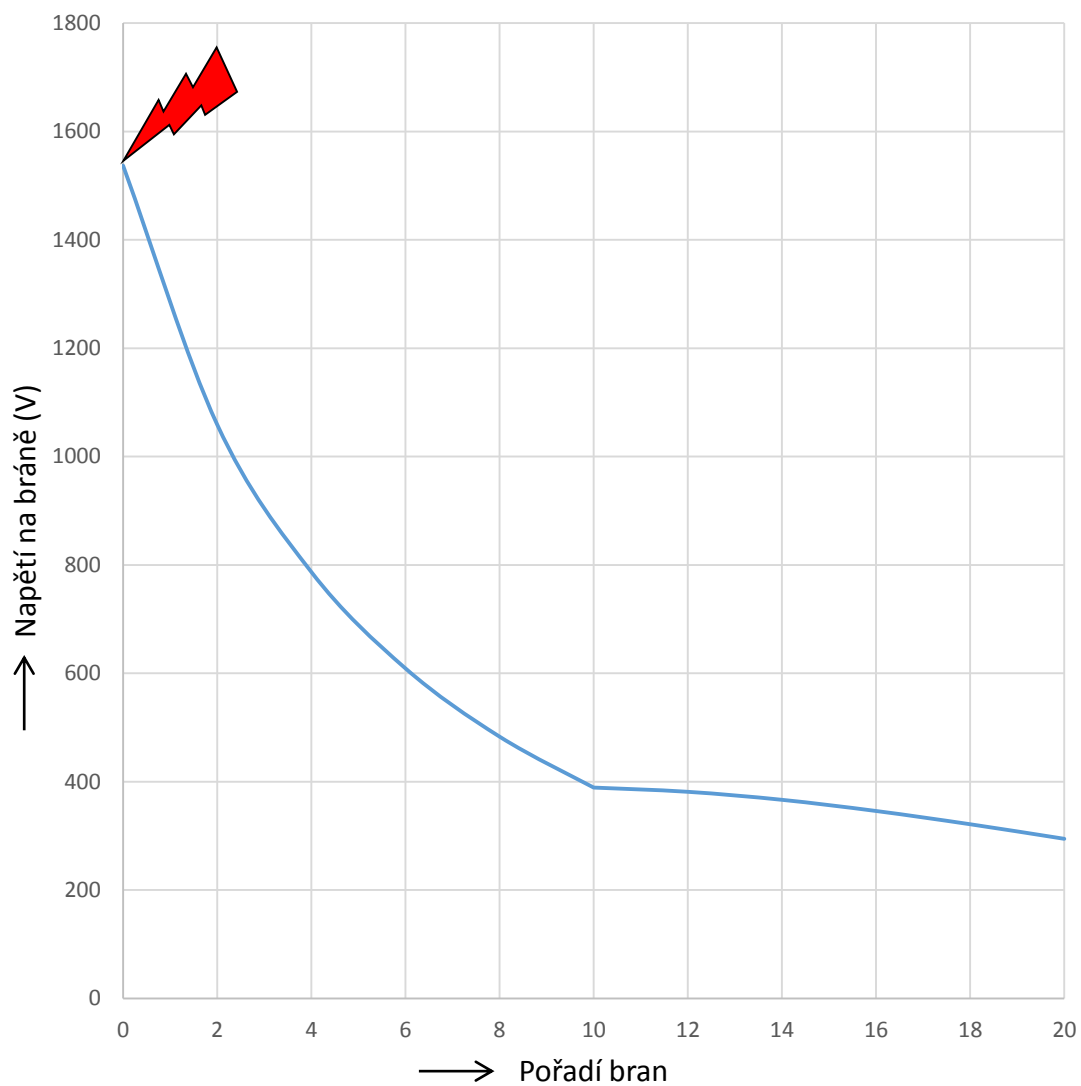
## 9.11.DC soustava, průběh napětí při zkratu uprostřed ukolejňovacího vedení



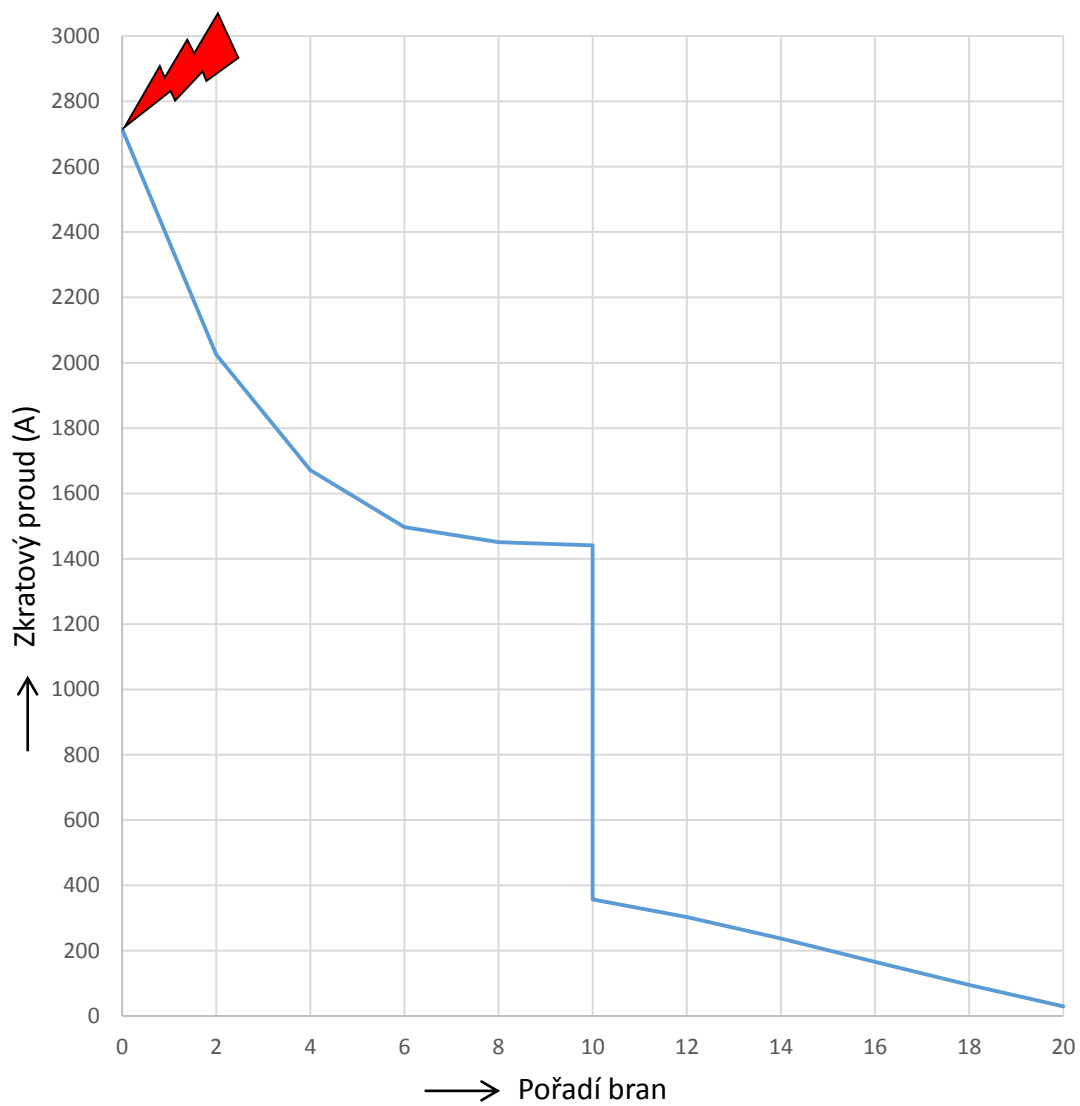
## 9.12.DC soustava, průběh napětí při zkratu uprostřed ukolejňovacího vedení



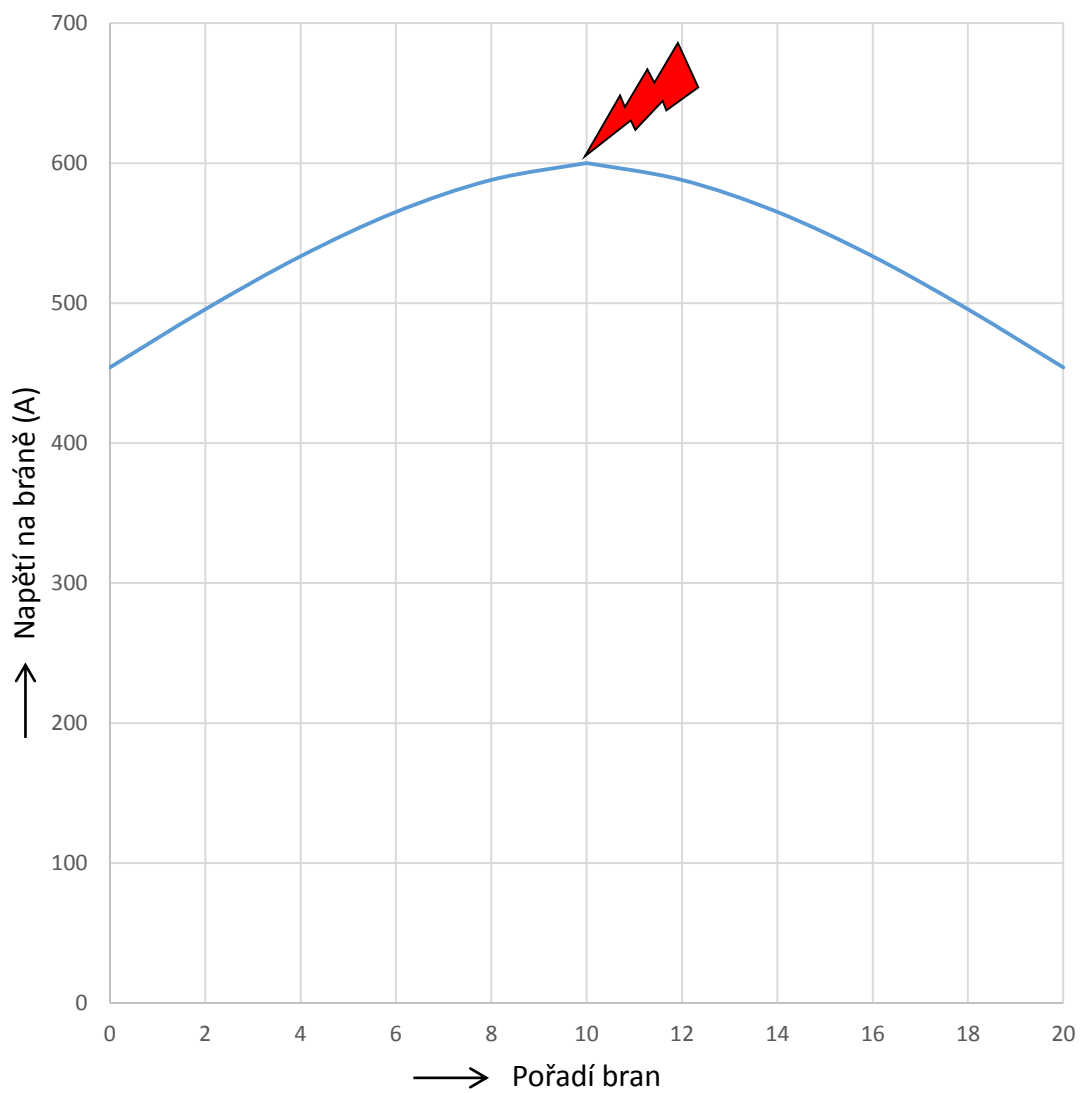
### 9.13.AC soustava, průběh napětí při zkratu na jednom konci ukolejňovacího vedení



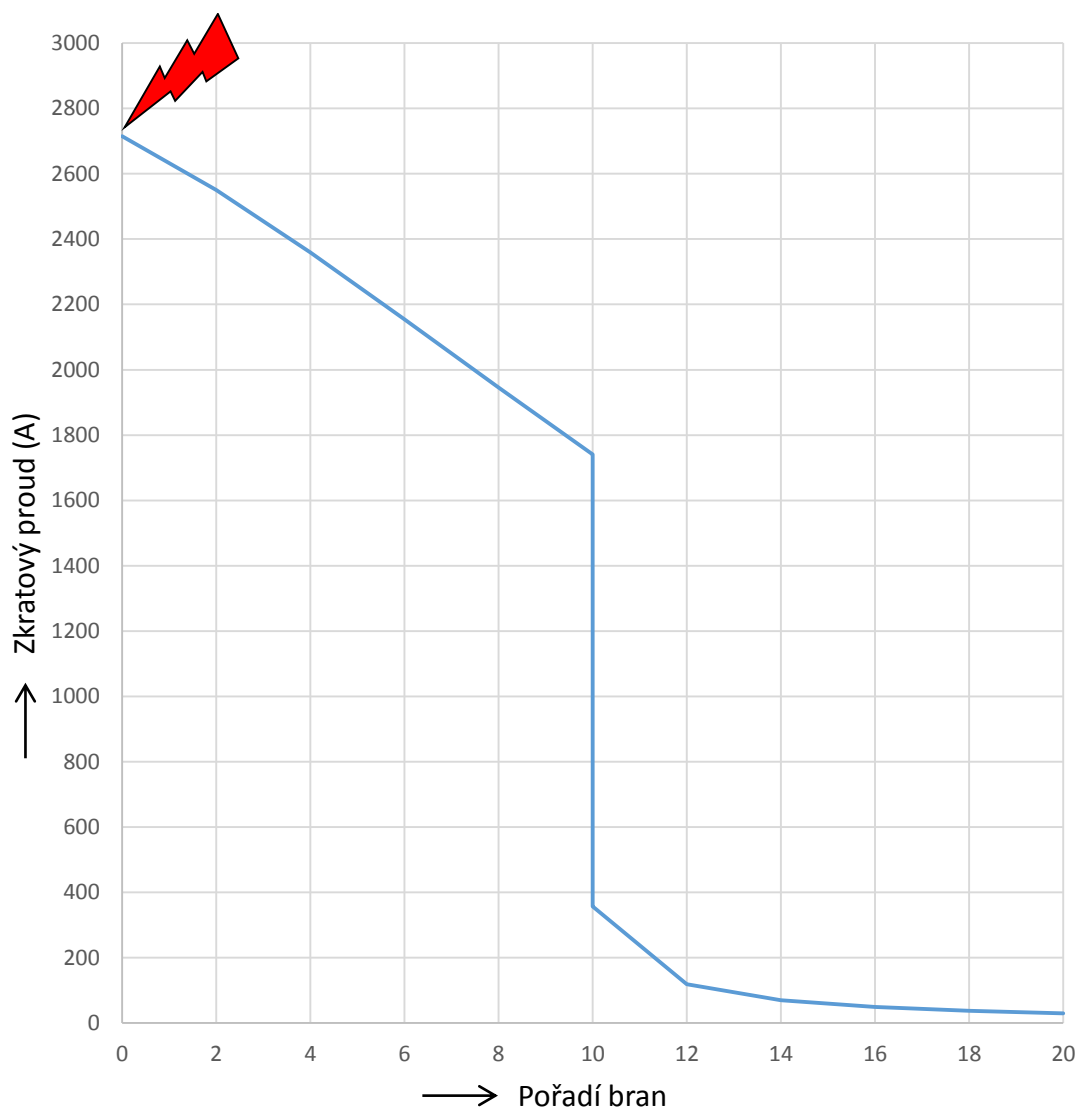
## 9.14.AC soustava, průběh proudu při zkratu na jednom konci ukolejňovacího vedení



### 9.15.AC soustava, průběh napětí při zkratu uprostřed ukolejňovacího vedení



## 9.16.AC soustava, průběh proudu při zkratu uprostřed ukolejňovacího vedení





## 9.17. Vyjádření průběhu povrchového potenciálu

