

<b>ČEPS, ČEZ Distribuce, E.ON CZ, E.ON Distribuce, PRE Distribuce, ZSE</b>	<b>NAVRHOVÁNÍ A UMISŤOVÁNÍ SVODIČŮ PŘEPĚTÍ V SÍTÍCH 110 KV</b>	<b>PNE 33 0000-9</b>
<b>Odsouhlasení normy</b>  Konečný návrh podnikové normy energetiky pro rozvod elektrické energie odsouhlasily tyto organizace: ČEPS, a.s., ČEZ Distribuce, a.s., PRE Distribuce, a.s., E.ON Distribuce, a.s., E.ON CZ, a.s., a ZSE Bratislava, a.s.		
<b>Nahrazuje:</b>	<b>Účinnost:</b> od 1.7.2010	

<b>OBSAH</b>	<b>strana</b>
1. VŠEOBECNĚ .....	3
1.1. Předmět normy .....	3
1.2. Rozsah platnosti .....	3
1.3. Normativní odkazy .....	3
1.4. Definice .....	4
1.4.1. omezovač přepětí bezjiskřišťový .....	4
1.4.2. přepětí .....	5
1.4.3. dočasné přepětí .....	5
1.4.4. koordinace izolace .....	5
1.4.5. Definice napětí .....	5
1.4.6. jmenovitý výbojový proud omezovače přepětí $I_n$ .....	5
1.4.7. třída vybití vedení .....	5
2. ZÁSADY DIMENZOVÁNÍ OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ .....	6
2.1. Volba trvalého provozního napětí $U_c$ .....	6
2.2. Volba jmenovitého napětí $U_r$ .....	6
2.2.1. Volba jmenovitého napětí $U_r$ omezovačů pro ochranu 110 kV částí transformoven 110/vn a pro ochranu transformátorů .....	6
2.2.2. Volba jmenovitého napětí $U_r$ omezovačů pro ochranu ve vývodech 110 kV, kabelových zaústění a vložených kabelů do vedení .....	6
2.2.3. Volba jmenovitého napětí - shrnutí .....	7
2.3. Volba třídy vybití omezovačů .....	7
2.3.1. Části 110 kV transformoven 110/vn .....	7
2.3.2. Omezovače u transformátorů velkých rozveden 110 kV a v dělicích místech mezi přípojnícemi ..	8
2.3.3. Omezovače ve vývodech, u kabelových zaústění rozveden a v dělicích místech ve vývodech .....	8
2.3.4. Vložené kabelové úseky .....	8
2.3.5. Souhrn - třídy vybití omezovačů .....	9
3. ZÁSADY PRO UMÍSTOVÁNÍ A PŘIPOJOVÁNÍ .....	9
3.1. Ochrana 110 kV částí transformoven 110/vn .....	9
3.1.1. Ochrana transformátorů .....	9
3.1.2. Ochrana ostatního zařízení transformovny 110 kV/vn .....	11
3.2. Ochrana transformátorů v rozvodnách 110 kV .....	12
3.3. Ochrana ostatního zařízení rozvodny 110 kV .....	12
3.3.1. Vývody venkovního provedení .....	12
3.3.2. Dělicí místa .....	12
3.3.3. Kabelová zaústění vedení do rozvodny 110 kV .....	13
3.3.4. Zapouzdřené spínací prvky - zařízení vývodů dead tank .....	13
3.3.5. Zapouzdřené rozvodny .....	13
3.3.6. Kabelová propojení v rozvodně .....	13
3.3.7. Kabelové úseky vložené do vedení .....	14
3.4. Podpurná ochranná opatření .....	15
3.4.1. Uzemnění stožárů před stanicí .....	15
3.4.2. Dvě zemnicí lana na přechodu vedení do kabelu .....	15
PŘÍLOHA .....	16
A ZÁKLADNÍ ÚDAJE O OCHRANĚ VVN SÍTÍ PROTI PŘEPĚTÍ .....	16
A.1 Charakteristika ochrany vvn sítí proti přepětí .....	16
A.2 Charakteristika atmosférických přepětí v sítích 110 kV .....	16
A.2.1 Parametry blesku .....	16
A.2.2 Četnost přímých úderů do vedení .....	17
A.2.3 Přepětí od přímých úderů do vedení .....	18
A.2.4 Přímé údery do fázových vodičů - EGM model .....	18
A.2.5 Přímý úder bez vzniku přeskočku na vedení .....	19
A.2.6 Rázová charakteristika přeskočku na vedení .....	19
A.2.7 Údery do stožárů a zemnicích lan - zpětné přeskočky .....	20

A.2.8	Četnost indukovaných atmosférických přepětí dané velikosti .....	22
A.3	METODA NAVRHOVÁNÍ OPTIMÁLNÍ OCHRANY ZAŘÍZENÍ OMEZOVAČI PŘEPĚTÍ.....	22
A.3.1	Statistika blesků.....	23
A.3.2	Elektrogeometrický model vedení.....	23
A.3.3	Model rozvodny s připojenými vedeními.....	23
A.3.4	Výpočet střední doby mezi PIH Sdpi .....	23
A.3.5	Výpočet střední doby mezi překročeními tepelné kapacity omezovačů.....	23
A.3.6	Přepětí nepřímých úderů (indukovaná přepětí) .....	24
A.4	Koordinace izolace zařízení sítí .....	24
B	OCHRANNÉ VLASTNOSTI RŮZNÝCH TYPŮ SVODIČŮ PŘEPĚTÍ.....	25
B.1	Hrotová jiskřiště .....	25
B.2	Bezjiskřišťové omezovače přepětí.....	25
B.3	Omezovače přepětí s jiskřišti.....	27
B.4	Porovnání bezjiskřišťových omezovačů přepětí.....	27
C	VOLBA JMENOVITÉHO NAPĚTÍ UR .....	27
D	PŘIPOJOVÁNÍ OMEZOVAČŮ VŠEOBECNĚ.....	29
D.1	Obecně platná pravidla pro připojování .....	31
D.2	Ochranný dosah omezovače .....	31
D.3	Vliv místa úderu na přepětí ve vloženém kabelovém úseku při ZP .....	31
D.4	Porovnání přepětí v kabelovém úseku při ZP na vedení s jedním a dvěma zemnicími lany .....	32

## 1. VŠEOBECNĚ

### 1.1. Předmět normy

Norma obsahuje soubor pravidel a doporučení, jak chránit zařízení vvn v sítích 110 kV před přepětím pomocí omezovačů přepětí s cílem dosáhnout minimální poruchovosti sítě z důvodu přepětí. Norma obsahuje doporučení pro správná umístění omezovačů, způsob připojení a volbu parametrů pro tato umístění.

### 1.2. Rozsah platnosti

Tato podniková norma energetiky je vypracována pro následující organizace:

ČEPS, a.s., ČEZ Distribuce, a.s., PRE Distribuce, a.s., E.ON Distribuce, a.s., E.ON CZ, a.s., a ZSE Bratislava, a.s.

Její platnost se vztahuje na sítě a rozvodny 110 kV provozované těmito společnostmi.

### 1.3. Normativní odkazy

ČSN 33 30 60 (1984)	Ochrana elektrických zařízení před přepětím
ČSN EN 60099-4 (2005)	Svodiče přepětí. Část 4: Bezjiskřišťové omezovače přepětí pro soustavy se střídavým napětím

STN EN 60099-4	Zvodiče prepätia. Časť 4: Beziskriskové obmedzovače prepätia na báze oxidov kovov pre sústavy so striedavým napätím
ČSN EN 60099-5 (2000)	Svodiče přepětí. Část 5: Doporučení pro volbu a použití
STN EN 60099-5	Zvodiče prepätia. Časť 5: Odporúčanie na volbu a použitie
ČSN 38 0810 (1987)	Použití ochran před přepětím v silových zařízeních
STN 38 0810	Použitie ochrán pred prepätím v silnoprúdových zariadeniach
ČSN EN 60071-1 (2006)	Elektrotechnické předpisy – Koordinace izolace – Část 1: Definice, principy a pravidla
STN EN 60071-1	Koordinácia izilácie – Časť 1: Definície, zásady a pravidlá
ČSN EN 60071-2 (2000)	Elektrotechnické předpisy – Koordinace izolace – Část 2: Pravidla pro použití
STN EN 60071-2	Koordinácia izilácie – Časť 2: Pravidlá pre použitie
IEC 60815 soubor(2008)	Výběr a dimenzování vysokonapěťových izolátorů pro použití v podmínkách znečištění ( <i>Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions</i> )
STN EN 50341-3/C3	Elektrická vonkajšie vedenia s menovitým napätím nad 45 kV AC – Časť 3, oddiel 19: Národné normatívni aspekty pre Slovenskú republiku
ČSN EN 50 341 – 3/Z2	Elektrická venkovní vedení s jmenovitým napětím nad 45 kV AC – Část 3: Soubor národných normativních hledísk
PNE 33 0000-1	Ochrana před úrazem elektrickým proudem v distribučních soustavách a přenosové soustavě

## Vypracování normy

Zpracovatel: Ing. Lubomír Kočíš, EGU- HV Laboratory, a.s.

Pracovník ONS energetiky: Ing. Jaroslav Bárta, ÚJV Řež, a.s., divize Energoprojekt Praha.

### 1.4. Definice

#### 1.4.1. omezovač přepětí bezjiskřišťový

Svodič přepětí, který má nelineární odpory z kysličníků kovů zapojené v sérii nebo paralelně bez jakýchkoli vložených sériových nebo paralelních jiskřišť

### **1.4.2. přepětí**

Přepětí je každé napětí mezi fází a zemí nebo mezi fázemi, jehož vrcholová hodnota přesahuje příslušnou vrcholovou hodnotu nejvyššího napětí pro zařízení.

### **1.4.3. dočasné přepětí**

Přepětí zpravidla síťového kmitočtu poměrně dlouhého trvání. Přepětí může být netlumené nebo slabě tlumené. Jeho kmitočet může být v některých případech několikrát nižší nebo vyšší než kmitočet sítě.

### **1.4.4. koordinace izolace**

Koordinace izolace je volba elektrické pevnosti zařízení ve vztahu k napětím, která se mohou vyskytnout v síti, pro kterou je zařízení určeno s respektováním provozních podmínek okolí a použitých ochranných zařízení

### **1.4.5. Definice napětí**

#### **1.4.5.1. trvalé provozní napětí omezovače přepětí $U_c$**

Trvalé provozní napětí je určená povolená efektivní hodnota střídavého napětí, která může být trvale mezi svorkami omezovače přepětí.

#### **1.4.5.2. jmenovité napětí omezovače $U_r$**

Maximální možná efektivní hodnota střídavého napětí průmyslového kmitočtu mezi svorkami omezovače přepětí, pro kterou je konstruován, aby působil správně v podmínkách dočasného přepětí tak, jak je stanoveno ve zkoušce provozní funkce v čl. 8.5. ČSN EN 60099-4. Jmenovité napětí se používá jako referenční parametr pro specifikaci provozních charakteristik.

#### **1.4.5.3. zbytkové napětí omezovače přepětí $U_{res}$**

Vrcholová hodnota napětí, která se objeví mezi svorkami omezovače přepětí, když jím prochází výbojový proud.

#### **1.4.5.4. nejvyšší napětí pro zařízení $U_m$**

Nejvyšší efektivní hodnota napětí mezi fázemi, na kterou je zařízení navrženo, pokud se týká izolace, jakož i jiných charakteristik, které podle příslušných norem pro zařízení s tímto napětím souvisejí.

#### **1.4.5.5. nejvyšší napětí sítě $U_s$**

Nejvyšší hodnota provozního napětí, která se může vyskytnout za normálního provozu v libovolném čase a na kterémkoli místě sítě.

### **1.4.6. jmenovitý výbojový proud omezovače přepětí $I_n$**

Vrcholová hodnota atmosférického proudového impulsu, která se používá pro klasifikaci omezovačů přepětí.

### **1.4.7. třída vybití vedení**

Číslo vyjadřující schopnost absorpce energie omezovače přepětí při vybití dlouhých vedení.

## 2. ZÁSADY DIMENZOVÁNÍ OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ

Omezovače přepětí se dimenzují podle konkrétního umístění v síti, tzn. podle toho, zda budou chránit např. transformátor, vývod vedení nebo přechod vedení do kabelu. V každém umístění mají omezovače specifické podmínky namáhání přepětími a specifické požadavky na ochranu.

### 2.1. Volba trvalého provozního napětí $U_c$

Nejvyšší napětí sítě (IEV 601-01-23) je  $U_n = 123$  kV. Nejvyšší fázové napětí je  $U_f = 123/1,73 = 71$  kV.

Nejvyšší trvalé napětí omezovače musí být s ohledem na vyšší harmonické  $U_c > 71$  kV  $\times 1,05 = 75$  kV - platí pro všechna místa v sítích 110 kV.

### 2.2. Volba jmenovitého napětí $U_r$

#### 2.2.1. Volba jmenovitého napětí $U_r$ omezovačů pro ochranu 110 kV částí transformoven 110/vn a pro ochranu transformátorů

Pro ochranu 110 kV částí transformoven 110/vn a pro ochranu transformátorů v rozvodnách se doporučuje volit  $U_r = 96$  kV. U transformoven často nebo trvale napájených jedním vedením se doporučuje volit  $U_r = 102$  kV.

Vzhledem k rezervě ochranné hladiny omezovačů s  $U_r = 96$  kV u transformátoru, také omezovače s  $U_r = 102$  kV vyhovují plně jako ochrana transformátorů.

Pokud je rozhodnuto provést instalaci omezovačů u transformátorů a ve všech vývodech, bude díky omezovačům ve vývodech hladina přepětí v celé rozvodně velmi nízká, a proto je výhodné z hlediska odolnosti proti dočasným přepětím použít všechny omezovače s vyšším jmenovitým napětím  $U_r = 102$  kV.

#### 2.2.2. Volba jmenovitého napětí $U_r$ omezovačů pro ochranu ve vývodech 110 kV, kabelových zaústění a vložených kabelů do vedení

Ve vývodech odpojených od rozvodny včetně kabelových zaústění nebo u vložených kabelových úseků do vedení je vyšší úroveň dočasných přepětí jak při odlehčení tak při zkratech ve srovnání s uzly rozvoden a transformoven, (omezovače u transformátorů).

Pro ochranu ve vývodu, kabelového zaústění nebo u vloženého kabelového úseku nebo ve vedení je vhodné volit omezovače se jmenovitým napětím  $U_r = 102$  kV.

V extrémních případech vedení dlouhých více než 120 km se doporučuje volit u omezovačů ve vývodu, u kabelového zaústění nebo u vloženého kabelového úseku  $U_r = 108 \text{ kV}$

### 2.2.3. Volba jmenovitého napětí - shrnutí

**Tabulka 1** Volba  $U_r$  podle umístění - shrnutí

Použití	Jmenovité napětí $U_r$ (kV)
Transformátory v rozvodnách	96
Transformátory napájené jedním vedením	102
Vývody, kabelová zaústění, vložené kabelové úseky	102
Vývody, kabel. zaústění, vlož. kabel. úseky u vedení nad 120 km	108

### 2.3. Volba třídy vybití omezovačů

Energie, kterou omezovač musí absorbovat při omezení přepětí, roste s napětím sítě, v níž je použit. Tato energie však roste rychleji než napětí. Proto omezovače v sítích s vyšším napětím musí mít větší energetickou kapacitu než omezovače v sítích s nižším napětím. Tomu odpovídá praxe aplikace omezovačů, tj. že v sítích vn se používají omezovače bez klasifikace třídy (5 kA) či třídy 1 nebo 2 (10 kA), sítích 110 kV se používají omezovače třídy 2 a 3, v sítích 220 kV omezovače třídy 2, 3 a 4 a konečně v sítích 400 kV omezovače třídy 3, 4 a 5.

Volba třídy vybití omezovače přepětí je založena na výpočtu četnosti překročení energetické kapacity omezovače v daném místě aplikace. Maximální přípustná četnost se určuje na základě vyhodnocení důležitosti bezporuchového provozu daného zařízení, z různých hledisek, např. ceny chráněného zařízení, nákladů na opravu, doby nucené odstávky, možnosti záskoku nebo rychlé náhrady apod.

#### 2.3.1. Části 110 kV transformoven 110/vn

Z vypočtených středních dob mezi překročeními tepelné kapacity omezovačů SDPe lze vyvodit následující závěr:

Pro normální podmínky všech 110 kV částí transformoven 110/vn je vyhovující omezovač třídy 3.

Při volbě omezovačů třídy 2 bude četnost překročení tepelné kapacity omezovače 2,5 x vyšší než s omezovači třídy 3. Proto se omezovače 2. třídy pro ochranu transformátorů 110 kV/vn nedoporučují.

Pro zvláštní podmínky se volí omezovač třídy 4. Zvláštní podmínky tvoří kombinace nepříznivých faktorů, které je nutno posoudit případ od případu:

- Odporů uzemnění prvních šesti stožárů nad 10  $\Omega$
- Vedení 110 kV bez zemnicích lan
- Provoz převážně s jedním připojeným vedením 110 kV
- Vedení v oblasti zvýšené bouřkové činnosti

Pokud jsou pro ochranu transformovny použity omezovače s  $U_r = 102$  kV, volí se u nich třída 3.

### **2.3.2. Omezovače u transformátorů velkých rozveden 110 kV a v dělicích místech mezi přípojnícemi**

Pokud jsou do rozvodny zaústěna více než 4 vedení 110 kV, rozptýlí se energie atmosférického přepětí přicházejícího po vedení nejen v omezovačích, ale i průnikem do ostatních vedení. Proto je v tomto případě energie absorbovaná omezovači u transformátorů menší než v případě transformoven s H systémem (cca poloviční) a lze pro ochranu transformátorů a dělicích míst mezi přípojnícemi použít omezovače třídy 2.

### **2.3.3. Omezovače ve vývodech, u kabelových zaústění rozveden a v dělicích místech ve vývodech**

Z výpočtů absorbované energie omezovačů při blízkých úderech vyplývá, že pokud je vývod zapojen do rozvodny, část energie přepětí pronikne přes omezovače do rozvodny a v tom případě by postačila třída vybití 2.

Absorbovaná energie omezovače ve vývodu se však zhruba zdvojnásobí, pokud je vývod odpojen od rozvodny a je podobná jako u transformoven systém H 1-1.

Proto je nutné zvážit, jaká vznikne úspora použitím omezovače 2 třídy a naopak jaké riziko vznikne provozem vypnutého vývodu s omezovačem 2. třídy. Vypnutý stav vedení nastává při 1 pólových OZ a následných úderech, které nastanou v časové pauze.

Proto se doporučuje použít ve vývodech omezovače třídy 3, zcela určitě u kabelových zaústění a zejména u dělicích míst ve vývodech, která jsou trvale ve vypnutém stavu.

Pro použití omezovačů třídy 4 platí stejná kritéria jako u transformoven 110 kV/vn viz odstavec 2.31.

### **2.3.4. Vložené kabelové úseky**

Pro zajištění maximální spolehlivosti omezovačů chránících vložený kabel a také vzhledem k poměru ceny kabelu a jeho případné opravy k ceně dvou sad



omezovačů se doporučuje použít pro ochranu vložených kabelů omezovače s třídou vybití 3.

### 2.3.5. Souhrn - třídy vybití omezovačů

Na základě výpočtů provedených pro typické aplikace, u nichž se předpokládají podobné napěťové a energetické poměry a s přihlédnutím k důležitosti bezporuchového provozu daných typů zařízení byly určeny vhodné třídy vybití a jmenovité proudy pro jednotlivé aplikace:

**Tabulka 2** Volba jmenovitého výbojového proudu a třídy vybití omezovačů přepětí podle druhu zařízení

Zařízení	Jmenovitý výbojový proud	Třída vybití
Transformovny 110 kV	10 kA	3
Transformátory v rozvodnách 110 kV	10 kA	2, 3
Vývody vedení, kabelová propojení v rozvodně	10 kA	2, 3
Kabelová zaústění, zapouzdřené rozvodny	10 kA	3
Vložené kabelové úseky	10 kA	3
Dělicí místa ve vývodech	10 kA	3
Dělicí místa mezi přípojnícemi	10 kA	2, 3

## 3. Zásady pro umístování a připojování

### 3.1. Ochrana 110 kV částí transformoven 110/vn

#### 3.1.1. Ochrana transformátorů

Ochrana transformátorů před atmosférickým přepětím při blízkých úderech do vedení 110 kV a při přímých úderech do rozvodny 110 kV je zajištěna omezovači přepětí u každého transformátoru.

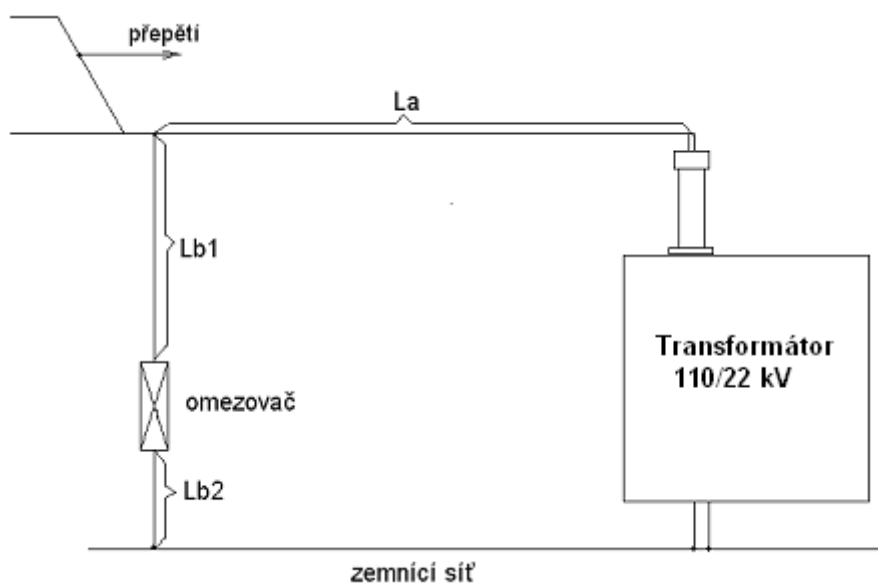
##### 3.1.1.1. Připojení omezovačů k transformátoru

Na obrázku 1 je schéma připojení omezovače k transformátoru. Na přepětí transformátoru mají vliv průřezy a délky vodičů  $L_a$  a  $L_b$  podle obrázku. Určení délek vodičů je učiněno za předpokladu, že průřezy vodičů jsou dimenzovány standardně na zkratové proudy.

$L_a$ ....délka vodiče s provozním proudem

$L_b$ ....délka vodiče s bleskovým proudem

Mnohem větší vliv na přepětí transformátoru má průřez a délka vodiče s bleskovým proudem. Proto je nutné jeho délku  $L_b$  minimalizovat. Optimální je  $L_b = 1$  až  $2$  m (podstavec včetně uzemňovacího pásku se počítá jako 1m ).



**Obrázek 1** Připojení omezovačů k transformátoru

Vodič s provozním proudem o délce  $L_a$  by měl být také co nejkratší. Z provedených výpočtů lze odvodit, že pro délku vodiče s provozním proudem  $L_a \leq 10$  m a při  $L_b = 1$  m nemůže dojít při blízkém úderu do vedení k překročení izolační hladiny transformátoru.

Kriterium limitních délek vodičů  $L_a$  a  $L_b$  pro přiměřenou ochranu transformátoru před přepětím od blízkých úderů do vedení a přímých úderů do stanice je:

$$L_a + 3 \cdot (L_{b1} + L_{b2}) \leq 30 \text{ m} \quad (2)$$

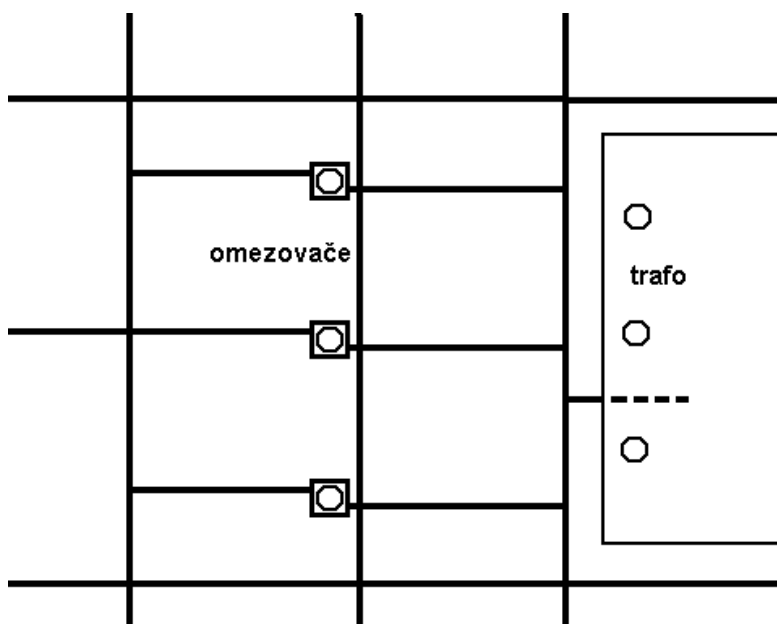
To znamená, že pro  $L_b = 1$  m, musí být  $L_a \leq 27$  m, což je praktická maximální délka vodičů mezi omezovači a transformátorem.

Pokud vodič  $L_{b2}$  je tvořen kovovou stoličkou, jejíž vnější průměr je roven nebo větší než průměr tělesa omezovače, počítá se tato délka ve vzorci (2) s koeficientem 1

$$L_a + 3 \cdot L_{b1} + L_{b2} \leq 30 \text{ m} \quad (2a)$$

### 3.1.1.2. Uzemnění omezovačů přepětí

Omezovače přepětí se nejkratším způsobem připojují na mřížovou uzemňovací síť elektrické stanice. Přitom se využívá konstrukčních kovových prvků, jako jsou kovové stoličky příhradové nebo z profilů, z trubky apod., které jsou příčně rozměrnější než uzemňovací pásy a mají tedy menší indukčnost. Na mřížovou síť musí být omezovače připojeny alespoň dvěma pásky vedenými do dvou protilehlých směrů s tím, že jeden pásek směřuje k chráněnému zařízení. Mezi omezovači a chráněným zařízením musí být vždy přímé paprsky sítě propojující omezovače a uzemňovací síť transformátoru. Pokud je uzemňovací síť v místě omezovačů řídká (oka sítě 10 m a větší), musí se provést její zahuštění. Vhodný způsob uzemnění je půdorysně znázorněn na obrázku 2.



**Obrázek 2** Půdorys sítě uzemnění omezovačů u transformátoru

Stejné požadavky na uzemnění omezovačů platí i pro ostatní umístění omezovačů v rozvodnách.

### 3.1.2. Ochrana ostatního zařízení transformovny 110 kV/vn

V základní konfiguraci rozvodny 110 kV H 2-2 a rozšířené H s připojenými oběma transformátory ochrana omezovači u transformátorů vyhovuje i jako ochrana zařízení celé elektrické stanice.

V případě provozu s jedním transformátorem je vývod proti připojenému transformátoru chráněn dobře, ochrana vývodu proti nepřipojenému transformátoru je na mezi přijatelnosti.

U stanic s delší přípojnici a v jiné než základní H konfiguraci záleží na konkrétních podmínkách - na vzájemné poloze a na počtu vývodových polí a polí transformátorů. Je-li elektrická vzdálenost přístrojů vývodu od omezovačů u transformátoru větší než 60 m, jedná se o nechráněný vývod a je nutné daný vývod posuzovat individuálně a zvolit pro daný případ vhodná dodatečná opatření ke snížení přepětí, která jsou:

- kontrola uzemnění prvních šesti stožárů. Hodnoty odporů uzemnění snížit pod  $10 \Omega$  u standardních vývodů a pod  $6 \Omega$  u nechráněných vývodů. První stožár případně připojit k zemnicí síti rozvodny.
- zabezpečit dobrý stav stínění zemnicími lany v blízkosti rozvodny, zkontrolovat by se mělo vykrytí fázových vodičů zemnicími lany mezi posledním stožárem a rozvodnou.

- instalovat omezovače přepětí do vývodu - snižují radikálně přepětí na přístrojích vývodového pole i v celé rozvodně 110 kV při příchodu přepětí z tohoto vedení.

### 3.2. Ochrana transformátorů v rozvodnách 110 kV

Pro rozvodny 110 kV, do nichž je zaústěno méně než 5 vedení 110 kV, platí stejná pravidla pro připojení omezovačů jako u transformátorů v trafostanicích 110/vn – viz odstavec 3.1.1. Pro rozvodny se zaústěním více než 4 vedení 110 kV platí následující kritérium limitních délek vodičů La a Lb

$$La + 2 \cdot (Lb1 + Lb2) \leq 50 \text{ m} \quad (3)$$

Tato pravidla se vztahují také na transformátory 400/110 kV resp. 220/110 kV. Požadavky na uzemnění omezovačů jsou stejné jako v odstavci 3.1.1

### 3.3. Ochrana ostatního zařízení rozvodny 110 kV

#### 3.3.1. Vývody venkovního provedení

V příloze je uveden výpočet četnosti překročení izolačních hladin zařízení vývodů. Vypočtené četnosti překročení izolačních hladin PIH zařízení vývodů jsou na kritické mezi přípustnosti podle obvyklých kritérií. Rozhodnutí o osazení omezovačů do vývodů by proto mělo odpovídat celkové koncepci investora a provozovatele zohledňující další hlediska. Jedním z faktorů je např. poměr ceny omezovačů a chráněného zařízení (PTK a vypínače). V neposlední řadě hraje roli i požadavek na spolehlivost provozu rozvodny 110 kV. Není tedy nutné apriori osazovat vývody rozvodny omezovači přepětí. Je to však možné učinit buď při požadavku na vysokou spolehlivost provozu nebo dodatečně na základě provozních zkušeností v případě např. výrazného zvýšení bouřkové činnosti v dané lokalitě, častého výskytu jednopólových OZ vývodu při bouřkách nebo při provozu vedení bez zemnicího lana (krádeže zemnicích lan). Je nutno také vzít v úvahu, že při blízkých přímých úderech do vedení je izolace zařízení vývodu namáhána velmi strmými a krátkými impulzy přepětí, které nezpůsobí přeskok ve vzduchu ani průraz v zařízení s olejovou náplní, ale nejrychleji na přepětí zareaguje zařízení s izolací plynem SF<sub>6</sub>, v níž může dojít k přeskoku v čele impulsu, pokud přepětí překročí výdržnou hladinu zařízení. U vývodových polí se vzdáleností přístrojů od přípojnice větší než 50 m se postupuje jako v bodě 3.1.2 - nestandardní uspořádání.

#### 3.3.2. Dělicí místa

Pokud bude některý vývod zůstat po většinu času z dispečerských důvodů s vypnutým vypínačem ale zapnutým vývodovým odpojovačem, např. je-li ve vývodu tzv. dělicí místo sítě 110 kV s připraveným záskokem pro případ výpadku jedné ze sousedících větví sítě, je namáhání zařízení vývodu (PTK, vypínač) atmosférickým

přepětím podstatně vyšší a řádově častější. Proto je nutné tento vývod chránit omezovači přepětí instalovanými na přechodu z vedení do vývodu.

### **3.3.3. Kabelová zaústění vedení do rozvodny 110 kV**

Kabelová zaústění vedení do rozvodny 110 kV se chrání omezovači přepětí připojenými na obou koncích kabelů.

Pouze kabelová zaústění kratší než 40 m lze chránit jen jednou sadou omezovačů na přechodu vedení - kabel.

### **3.3.4. Zapouzdřené spínací prvky - zařízení vývodů dead tank**

Vzhledem k ceně a kompaktnosti těchto zařízení se doporučuje chránit je na vstupu venkovními omezovači přepětí. Pokud ve vývodu vznikne kombinace kabelového zaústění a kompaktního zařízení dead tank, doporučuje se mezi kabel a kontejner vložit venkovní omezovače přepětí, které chrání jak kabel tak zařízení kontejneru. Omezovače není nutné mezi kabel a kontejner vkládat, pokud je kabelové zaústění kratší než 40 m a pokud jsou podle předešlého bodu omezovače na přechodu vedení- kabel.

### **3.3.5. Zapouzdřené rozvodny**

Zapouzdřené rozvodny 110 kV s vývody přímo do venkovních vedení se chrání na přechodech vedení - zapouzdřená rozvodna omezovači přepětí. Pokud mají zapouzdřené rozvodny kabelová zaústění, musí být přechody vedení-kabel opatřeny omezovači přepětí. Pokud jsou kabelová zaústění delší než 40 m, doporučuje se instalovat další sady omezovačů mezi kabel a zapouzdřený vývod. Není-li to technicky možné, nebo je to nákladné, doporučuje se realizovat na zaústění venkovního vedení podpůrná opatření jako instalaci dvou zemnicích lan v posledních třech rozpětích a snížení odporu uzemnění stožárů. Také se nedoporučuje v tomto případě vývod provozovat ve vypnutém stavu.

U zapouzdřených rozvodnů malého rozsahu (např. H systém) s kabelovými zaústěními venkovních vedení chráněnými omezovači přepětí na obou koncích se transformátory 110 kV/vn nemusí chránit dalšími omezovači přepětí, pokud přívody mezi zapouzdřenou rozvodnou a transformátory nejsou delší než 15 m.

### **3.3.6. Kabelová propojení v rozvodně**

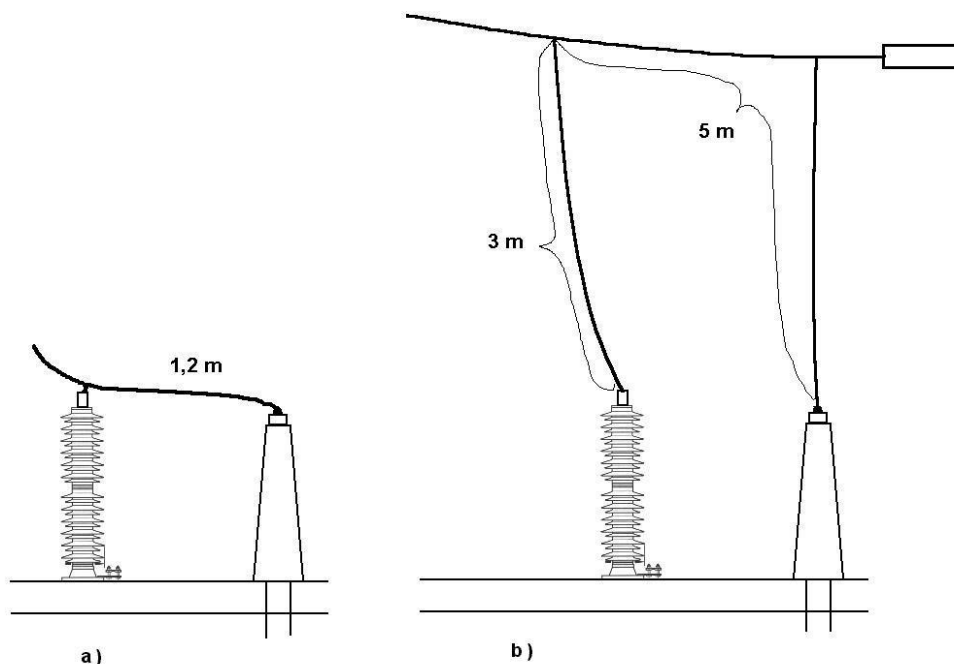
Zpravidla propojují transformátor zvn/110 kV s rozvodnou 110 kV. Omezovače se instalují mezi transformátor a kabel (ochrana transformátoru) a obecně by měly být instalovány i na opačném konci kabelu. Vynechání těchto druhých omezovačů je možné za podmínky, že bude podloženo rozbořem a výpočty přepětí v dané konfiguraci.

### 3.3.7. Kabelové úseky vložené do vedení

Na základě podrobné analýzy přepětí ve vložených kabelových úsecích při úderech blesku do vedení v blízkosti přechodu do kabelu, jsou učiněna následující doporučení:

Každý úsek vloženého kabelu nezávisle na jeho délce musí být chráněn omezovači přepětí instalovanými na obou koncích kabelů.

Omezovače přepětí musí být připojeny způsobem znázorněným na obrázku 3 a).



**Obrázek 3** Správné (a) a nesprávné (b) připojení omezovačů

Nejmenší přípustná osová vzdálenost omezovače a kabelové koncovky je 1,2 m. Tato podmínka platí i pro jiná umístění omezovačů přepětí v blízkosti zařízení 110 kV, k nimž jsou připojeny. Tato minimální přípustná vzdálenost platí za podmínky, že vvn svorky omezovače a zařízení jsou zhruba ve stejné výšce (na stejné úrovni). Pokud tato podmínka není splněna, musí být osová vzdálenost omezovače a zařízení 110 kV přiměřeně vyšší pro dodržení minimálních vzdáleností fáze-zem.

V posledních dvou rozpětích mezi přechodovým stožárem, prvním a druhým stožárem se doporučuje instalovat dvě zemnicí lana se vzájemnou vzdáleností přinejmenším rovnou vzdálenosti fázových vodičů i v případě, že se v posledním rozpětí mění geometrie vodičů přechodem na koncový stožár, který je jiného typu, než jsou stožáry vedení.

Odpory uzemnění přechodového stožáru a 1. stožáru vedení musí být co nejnižší a ne vyšší než 10  $\Omega$ . Z hlediska ochrany proti atmosférickému přepětí jsou vhodnější přibližně stejné hodnoty odporu uzemnění těchto dvou stožárů.

Nelze připustit dlouhodobě provoz vedení s vloženými kabely při zcizení zemnicích lan v rozpětích mezi přechodovým stožárem a dvěma posledními stožáry vedení, protože v takovém stavu se výrazně zvýší pravděpodobnost poruchy kabelu a zejména pravděpodobnost zničení omezovačů přepětí při blízkém úderu blesku do vedení.

### **3.4. Podpůrná ochranná opatření**

Jsou to z hlediska ochrany omezovači přepětí důležitá doplňková ochranná opatření, která činí systém ochrany více vyvážený, který nespolehá pouze na omezovací schopnost omezovačů přepětí, ale zajistí, aby hlavní část energie blesku byla svedena jinou cestou.

K podpůrným opatřením patří:

#### **3.4.1. Uzemnění stožárů před stanicí**

Při blízkém úderu blesku do vedení je přepětí přicházející na chráněné zařízení složeno z velmi rychlých špiček s malou energií a pomalejší vlny s velkou energií. Vrcholová hodnota přepětí a energie této vlny je úměrná odporu uzemnění nejbližších stožárů. Tuto energii z velké části musí absorbovat omezovače přepětí chránící zařízení. Proto je důležité, aby zejména odpor uzemnění 1. stožáru před přechodovým stožárem byl co nejnižší a ne více než  $10 \Omega$ . Při úderech do vzdálenějších stožárů s vyšším odporem nastanou na vedení tzv. následné přeskoky, které přepětí vstupující do kabelu významně zmírní.

#### **3.4.2. Dvě zemnicí lana na přechodu vedení do kabelu**

U vložených kabelových úseků by poslední dvě rozpětí mezi přechodovým stožárem a 1. a 2. stožárem před přechodem měla být vybavena dvěma zemnicími lany se vzájemnou vzdáleností přinejmenším rovnou vzdálenosti fázových vodičů i v případě, že se v posledním rozpětí mění geometrie vodičů přechodem na koncový stožár, který je jiného typu, než jsou stožáry vedení.

## PŘÍLOHA

### A Základní údaje o ochraně vvn sítí proti přepětí

#### A.1 Charakteristika ochrany vvn sítí proti přepětí

V sítích 110 kV s venkovními vedeními je nutné chránit zařízení zejména proti atmosférickým přepětím. Spínací přepětí dosahují nižších úrovní než atmosférická.

V kabelových sítích bez připojených venkovních vedení jsou největší přepětí způsobená zkraty, zemními spojeními a nebo spínáním.

Dočasná přepětí 50 Hz namáhají více samotné omezovače přepětí než chráněná zařízení.

Ochranná opatření mají snižovat nepříznivé účinky bouřkové činnosti na sítě 110 kV, které se projevují:

- výpadky dodávky
- zhoršením kvality dodávané energie
- zničením zařízení sítě vvn nebo zkrácením jeho životnosti, což zvyšuje náklady provozovatele

Prvořadým úkolem ochranných opatření, který je ekonomicky zcela opodstatněný, je chránit zařízení sítí vvn před zničením atmosférickým přepětím.

#### A.2 Charakteristika atmosférických přepětí v sítích 110 kV

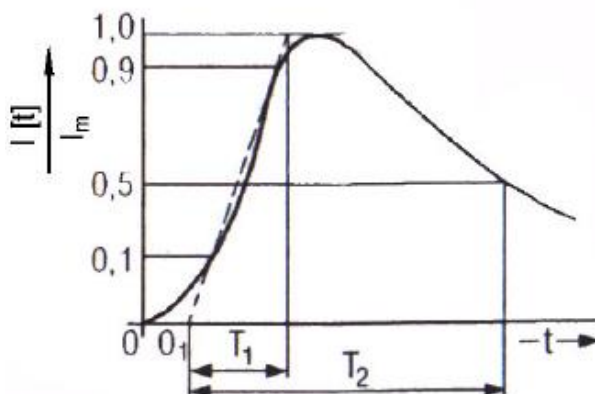
##### A.2.1 Parametry blesku

Úder blesku do země sestává zpravidla z prvního výboje a několika následných výbojů, které proběhnou jedním vodivým kanálem v rychlém sledu za sebou s celkovou dobou trvání několika stovek ms až 1 s.

Na základě měření bleskových výbojů je znám typický časový průběh prvního výboje a následných výbojů. Jedná se o impulsy s rychlým počátečním náběhem proudu (jednotky mikrosekund) do vrcholové hodnoty a pomalejší klesající částí. Základní charakteristiky jednotlivého impulsního výboje proudu blesku jsou (obrázek A1):

- čelo impulsu (vzrůstající část k vrcholu) s dobou čela  $T_1$ ,
- vrchol impulsu (maximální hodnota) s vrcholovou hodnotou proudu  $I_p$ ,
- tyl impulsu (klesající část od maxima) s dobou půltýlu  $T_2$ .





**Obrázek A1** Typický časový průběh proudu jednotlivého výboje blesku

Následné výboje jsou opakované výboje v dráze prvního výboje, která zůstává po prvním výboji zionizovaná. Po prvním výboji se v mraku změní radikálně rozložení nábojů a napěťové spády. To vede k následným výbojům v mraku do míst vzniku prvního výboje a jejich pokračování k zemi ještě stále vodivým kanálem. Oproti prvnímu výboji následné výboje mají vyšší strmost nárůstu proudu ale nižší jeho vrcholovou hodnotu. Rozdělení četnosti výskytu počtu výbojů při úderu blesku je v tabulce 1. Následné výboje zvyšují celkovou energii blesku v průměru o 40 %.

**Tabulka 1** Rozložení četnosti počtu výbojů v úderu blesku v případě záporných blesků mrak-země

Počet úderů blesku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	≥10
Četnost výskytu (%)	45	14	9	8	8	4	3	3	2	4

Parametry proudu výbojů v blesku mají také statistický charakter. Pravděpodobnosti výskytu parametrů proudu prvního a následných výbojů úderu do země se zápornou polaritou jsou v tabulce 2.

**Tabulka 2 - Pravděpodobnosti výskytu parametrů prvního a následných výbojů záporného úderu blesku do země**

Četnost	95 %		50 %		5 %	
	první	následný	první	následný	první	následný
Výboj						
$I_p$ (kA)	14	4,6	30	12	80	30
$di/dt$ (kA/μs)	5,5	12	12	40	32	120

### A.2.2 Četnost přímých úderů do vedení

Četnost přímých úderů do vedení za rok na 100 km vedení  $N_d$  se vypočítá ze vztahu

$$N_d = 0,1 \cdot K_o \cdot N_g (b+10,5 \cdot H^{0,75}) \quad (P1)$$

kde

$N_g$  četnost úderů do země na 1 km<sup>2</sup> a rok ( na území ČR typicky 2 až 3 údery /km<sup>2</sup> a rok)

H průměrná výška vedení v m

b horizontální vzdálenost mezi krajními vodiči

$K_o$  orografický koeficient

Orografický koeficient vyjadřuje stínící účinek okolního terénu a pohybuje se v rozmezí 0,03 pro vedení v hlubokém údolí až 3 pro vedení na horní hraně úbočí.

Pro vedení v rovině je  $K_o = 1$ .

Např. pro vedení 15 m vysoké 100 km dlouhé v rovině v oblasti s četností úderů blesku do země  $N_g = 3$  údery / km<sup>2</sup> a rok je  $N_d = 27$  úderů do vedení za rok.

### A.2.3 Přepětí od přímých úderů do vedení

U vedení 110 kV chráněných jedním nebo dvěma zemnicemi lany většina blesků udeří do stožáru nebo do zemnicího lana s případným vznikem zpětného přeskočků ZP - viz dále, pouze malá část blesků udeří do fázových vodičů a vzniknou tak tzv. přímé údery do fázových vodičů PÚ.

Přímý úder blesku do fázového vodiče tedy znamená poruchu jeho stínění zemnicím lanem. Pro vyhodnocení stínícího účinku zemnicího lana se používá elektrogeometrický model (EGM).

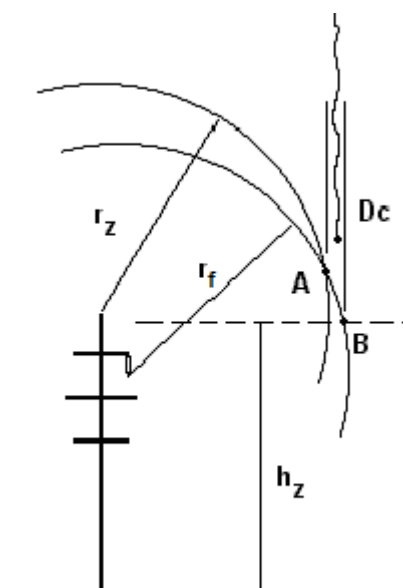
### A.2.4 Přímé údery do fázových vodičů - EGM model

Pro vyhodnocení stínícího účinku zemnicího lana se používá elektrogeometrický model (EGM) založený na fyzikálním předpokladu, že postupující lídr blesku v určité vzdálenosti  $r$  od vedení doskočí na ten vodivý objekt, který je v ten okamžik nejbližší čelu lídru. Doskoková vzdálenost  $r$  k vodivému objektu je úměrná hustotě náboje postupujícího lídru. Protože hustotě náboje lídru je zase úměrný proud výboje blesku (který následuje), lze najít vztah mezi velikostí proudu výboje a doskokovou vzdáleností lídru. Ten je v obecné podobě

$$r = A I^b \quad (P2)$$

kde A, b jsou konstanty, které závisí na tvaru objektu a I je vrcholová hodnota proudu blesku. V případě vedení postupující lídr může doskočit buď na zemnicí vodič nebo stožár, na zem nebo na fázový vodič.

Vzdálenost r je tedy tím větší, čím je větší proud blesku. Pomocí EGM se hledá geometrický prostor bodů ve vzdálenosti r, z nichž může blesk doskočit na fázový vodič. Na obrázku 2 jsou pro konfiguraci vodičů na nosném stožáru soudek nakresleny v kolmém řezu dvě válcové plochy, jedna s osou v zemnicím lanu, druhá s osou ve vrchním fázovém vodiči a rovina rovnoběžná se zemí. Poloměry  $r_z$  a  $r_f$  válcových ploch a vzdálenost roviny od země  $h_z$  jsou závislé na velikosti proudu výboje podle vzorce (P2) - viz obrázek A2. Tento prostor je tím užší, čím větší je proud blesku až pro určitou mezní velikost proudu blesku  $I_{pm}$  tento prostor úplně vymizí.



**Obrázek A2 EGM přímého úderu do fázového vodiče vedení 110 kV se stožáry soudek**

Pro běžné geometrie vodičů na stožárech je  $I_{pm} = 5$  až  $14$  kA. Protože však pravděpodobnost poruchy stínění mezním proudem je teoreticky nulová, používají se pro výpočet přepětí při přímém úderu menší proudy, které se mohou při úderu do fázového vodiče vyskytnout s přiměřeně nenulovou četností, typické hodnoty jsou 3 až  $10$  kA.

### A.2.5 Přímý úder bez vzniku přeskočů na vedení

Pokud k přímému úderu do fázového vodiče dojde, vznikne na něm vlna přepětí, která se šíří na obě strany, s vrcholovou hodnotou napětí

$$U_p = Z_v \cdot I_p / 2 \quad (P3)$$

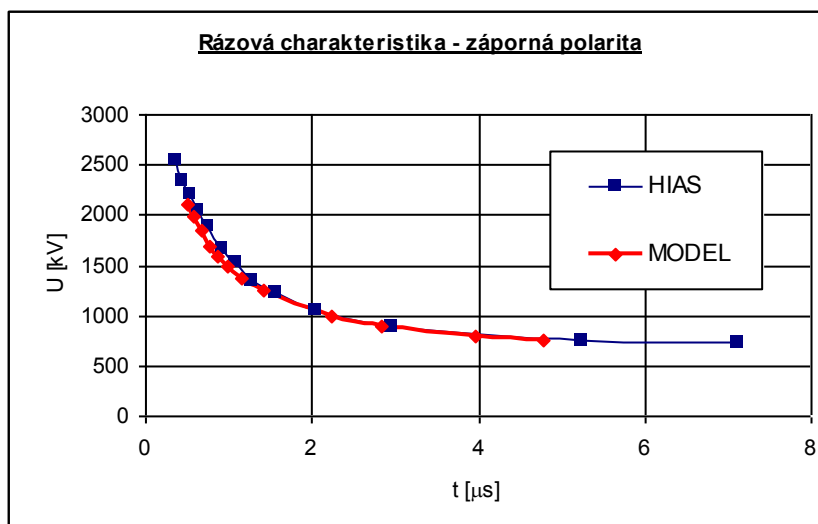
kde  $Z_v$  je vlnová impedance vedení a  $I_p$  je vrcholová hodnota proudu blesku.

U vedení  $110$  kV soudek je  $Z_v \cong 460 \Omega$ , tzn. že již při proudu blesku  $4$  kA je  $U_p = 460 \cdot 4000 / 2 = 920$  kV a na nejbližším izolačním závěsu musí dojít k přeskočů. Pro proudy blesku do  $3$  kA k přeskočů nedojde a po vedení se šíří plná vlna přepětí cca  $700$  kV.

### A.2.6 Rázová charakteristika přeskočů na vedení

Rázovou charakteristikou je pravidlo, že obecně - čím větší se na elektrodách objeví napětí tím rychleji se rozvíjí lídr - vůdčí výboj a tím dříve dojde k přeskočů. V případě napěťových atmosférických impulsů to znamená, že čím strmější je nárůst impulsního napětí v čase, tím dříve dojde k přeskočů, ale při vyšším napětí nebo také, čím větší je vrcholová hodnota napětí při stejné době čela impulsu, tím dříve dojde k přeskočů (také ovšem při vyšším napětí).

Pro simulační výpočty přeskových napětí byl vytvořen tzv. "Leader development model", tzn. program, který vypočítává v každém kroku rychlost vývoje lídru překlenujícího doskokovou vzdálenost v závislosti na okamžité hodnotě napětí na zbývajícím doskoku. Tento model umí poměrně realisticky napodobit rázovou charakteristiku přeskovu i pro nestandardní tvary vln, které jsou ostatně při úderech blesku nejčastější. Parametry modelu přeskovu pro izolátorový závěs 110 kV byly nastaveny pomocí měření Volt-sekundové charakteristiky přeskoků při impulsním přepětí s tvarem 1,4/50  $\mu\text{s}$  na reálném závěsu s izolátorem LS v laboratoři. V grafu na obrázku A3 je porovnání změřené charakteristiky a modelové.



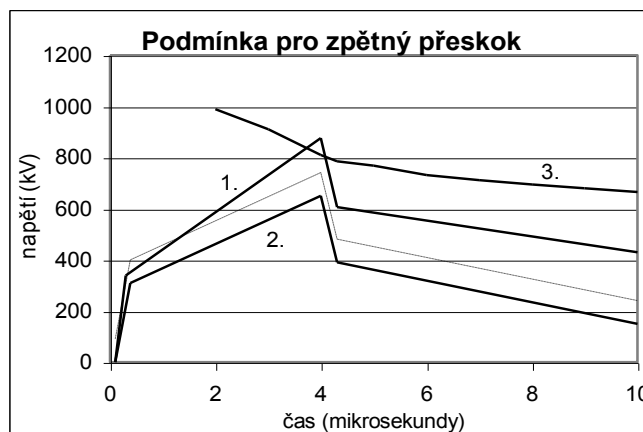
**Obrázek A3 Porovnání měřené (HIAS) a modelované rázové charakteristiky**

Z grafu je patrné, že zatímco polovinové přeskové napětí, kdy k přeskovu dochází v tylé impulsu v časech 6 až 8  $\mu\text{s}$  je cca 700 kV, pro přeskovy v čele impulsu v časech kratších než 1,4  $\mu\text{s}$  roste přeskové napětí nad 1500 kV.

### A.2.7 Údery do stožárů a zemnicích lan - zpětné přeskoky

Při úderu do stožáru nebo zemnicího lana v jeho blízkosti je největší část bleskového proudu svedena přes konstrukci stožáru do země. Menší část proudu teče zemnicími lany do sousedních stožárů. Přitom dojde ke krátkodobému zdvihu potenciálu stožáru u silných blesků o stovky kV až 2 MV. Potenciál fázových vodičů se vlivem indukce také zvýší, ale mnohem méně. Na izolátorech se objeví krátkodobě rozdílové napětí i více než 1 MV a může nastat zpětný přeskok na fázový vodič. Rozhoduje o tom mnoho faktorů: jednak parametry blesku, které mají statistický charakter - strmost čela impulsu proudu a vrcholová hodnota proudu, jednak parametry vedení - hlavně stožárů: vlnová impedance a výška konstrukce stožáru mezi fázovou konzolí a uzemněním, odpor uzemnění, délka rozpětí k sousedním stožárům, počet zemnicích lan, geometrie fázových vodičů a zemnicího lana mající vliv na indukci. Dalším rozhodujícím faktorem je okamžitá hodnota fázového napětí 50 Hz, která se buď přičítá nebo odčítá od napětí mezi stožárem a fázovým vodičem.

Zjednodušené kritérium zpětného přeskočení je na obrázku A4. Pro určitou strmost nárůstu proudu blesku a určitou jeho vrcholovou hodnotu a při zanedbání vlivu zemnicích lan, má přepětí na stožáru (na konzoli) tvar podle čáry 1- nejprve strmý nárůst jehož strmost je dána součinem proudu a vlnové impedance stožáru a doba strmého nárůstu odpovídající výšce stožáru (ke konzoli). Dále pokračuje mírnější nárůst daný součinem proudu a odporu uzemnění stožáru. Křivka 3 v grafu je rázová charakteristika izolačního závěsu, tzn. závislost přeskovového napětí na strmosti nárůstu napětí. V případě, že čára přepětí na konzoli překročí nezanedbatelnou plochou čárou rázové charakteristiky, je pravděpodobné, že dojde ke zpětnému přeskočení.



**Obrázek A4 Zjednodušené kritérium pro zpětný přeskok**

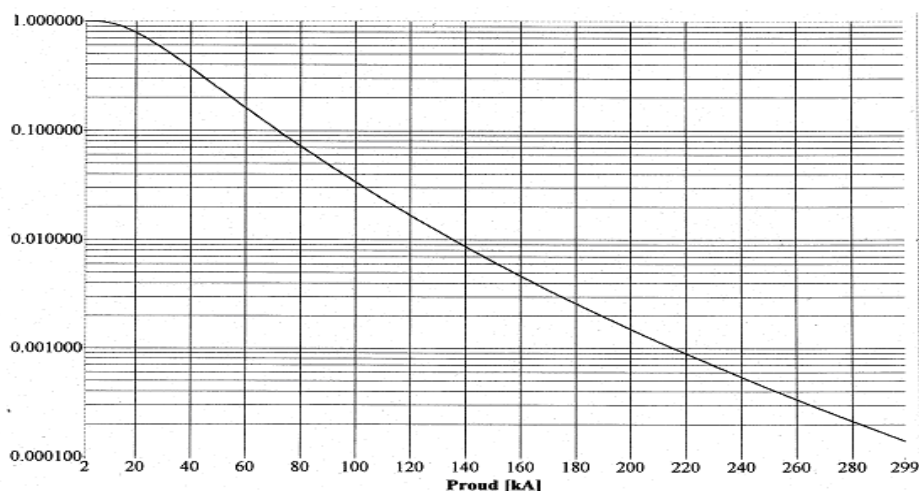
Vliv zemnicích lan se při úderu do stožáru projeví dvojnásobným příznivým způsobem na snížení výskytu zpětného přeskočení: Zemnicí lana snižují impedanci v místě úderu - odvádí část proudu k sousedním stožárům a tím snižují přepětí na stožáru s úderem cca o 10 až 20 % v závislosti na délce rozpětí. Zároveň se elektromagnetickou vazbou mezi zemnicím lanem a fázovými vodiči indukuje do fázových vodičů napětí, které snižuje rozdíl napětí na izolátorovém závěsu stožáru s úderem o 15 až 25 %. Tento dvojnásobný vliv zemnicích lan se projeví menším nárůstem napětí na izolačním závěsu (čára 2) se snížením přepětí ve vrcholu o cca 23 až 40 %, což v zobrazeném případě znamená nesplnění podmínky pro zpětný přeskok.

Okamžitá hodnota napětí 50 Hz fázového vodiče se přičte k napětí na konzoli a znamená posunutí čáry přepětí na izolačním závěsu nahoru (přerušovaná čára).

Graf na obrázku A4 může sloužit jako pomůcka např. při hrubém odhadu četnosti zpětných přeskočení určité části vedení. Mnohem přesněji se zpětné přeskočení počítají na numerickém modelu vedení.

Na modelu konkrétního vedení 110 kV se vypočte, při jak velkém proudu  $I_p$  úderu nastane zpětný přeskok ZP a potom se zjišťuje četnost  $N_{ZP}$  takové události. Tu určuje součin četnosti všech úderů blesků do vedení  $N_d$  spočtené pomocí vzorce (P1) a relativní četnosti blesku  $n_{I_p}$  s proudem  $I_p$  a větším, kterou lze odečíst z grafu na obrázku A 5.

$$N_{ZP} = N_d \cdot n_{I_p} \quad (P4)$$



**Obrázek A5 Relativní četnost úderu  $n_{ip}$  v závislosti na vrcholové hodnotě proudu blesku – semilogaritmické zobrazení pro velké proudy (podle CIGRE)**

### A.2.8 Četnost indukovaných atmosférických přepětí dané velikosti

Četnost indukovaných napětí fáze proti zemi na 100 km vedení a rok vyšší než určitá hodnota  $U$  v kV

$$N_i = 0,19 \cdot [3,5 + 2,5 \cdot \log_{10}(30 \cdot (1 - c)/U)]^{0,75} \cdot N_g \cdot H \quad (P5)$$

$c$  je činitel vazby mezi zemnicím lanem (pokud je) a fázovým vodičem a  $H$  je výška FV nad zemí. Pokud není zemnicí lano, potom  $c = 0$ . Pokud je zemnicí lano uzemněné na každém sloupu s odporem menším než  $50 \Omega$ , potom  $c = 0,3$  a  $0,4$ . (zemnicí lano snižuje přepětí o 30 až 40 %). Pokud zemnicí lano není uzemněné na každém sloupu, snižující účinek je menší.

Jako příklad jsou v tabulce 3 vypočtené četnosti přepětí v závislosti na jeho velikosti pro fázový vodič 12 m nad zemí na 100 km vedení a rok v oblasti s  $N_g = 3$  údery /rok a  $\text{km}^2$ .

**Tabulka 3**

$U_p$ (kV)	četnost za rok
100	9,9
200	6,2
300	3,7
400	1,5
450	0,13

### A.3 METODA NAVRHOVÁNÍ OPTIMÁLNÍ OCHRANY ZAŘÍZENÍ OMEZOVAČI PŘEPĚTÍ

Zatímco spínací přepětí je možné měřit a výsledky vyhodnotit a zevšeobecnit, je obtížné nebo přinejmenším velmi nákladné experimentovat s atmosférickými

přepětími. Proto se pro účely koordinace izolace a optimalizace ochrany proti atmosférickému přepětí v sítích vn a vvn používají různé metody výpočtů kombinované se statisticky zpracovanými daty o blescích. Pro analýzu přepětí se používají počítačové programy simulující elektromagnetické jevy v kovových strukturách.

### **A.3.1 Statistika blesků**

Vstupním údajem pro výpočet je četnost úderů blesku do země a rozdělení četnosti vrcholových hodnot proudu blesku a rozdělení četnosti strmostí čela impulsu.

### **A.3.2 Elektrogeometrický model vedení**

Pomocí EGM modelu se vypočtou statisticko-proudové parametry úderů blesků do vedení - přímých úderů do fázových vodičů a zpětných přeskoků - viz kapitola A2.4 až A2.7

### **A.3.3 Model rozvodny s připojenými vedeními**

V simulačním programu se vytvoří model příslušné konfigurace vedení (včetně stožárů, geometrie vodičů, modelů přeskoků) a chráněného zařízení popř. rozvodny (včetně všech přístrojů, kabelů, omezovačů přepětí). Simulují se úderů blesku do vedení pro určitý rozsah proudových parametrů blesku a kontroluje se, při jakých parametrech blesku dojde k překročení izolačních hladin PIH jednotlivých zařízení.

### **A.3.4 Výpočet střední doby mezi PIH Sd<sub>pi</sub>**

Z výsledků modelových výpočtů PIH se určí statistická četnost blesků, které vedou k překročení izolačních hladin zařízení a tím se určí statistická četnost výskytu PIH těchto zařízení. Převrácená hodnota četnosti PIH je střední doba mezi dvěma překročeními izolační hladiny zařízení Sd<sub>pi</sub>.

Výpočet se provede pro nechráněná zařízení a pro různé varianty ochrany omezovači, pokud připadají v úvahu. Pro všechny varianty výpočtu se určí Sd<sub>pi</sub> pro jednotlivá chráněná zařízení a pro celý systém. Sd<sub>pi</sub> systému se vypočte jako převrácená hodnota součtu převrácených hodnot Sd<sub>pi</sub> jednotlivých zařízení (neboli celková četnost PIH systému je součtem četností PIH jednotlivých zařízení).

Provede se zhodnocení zjištěných Sd<sub>pi</sub>. Pro jednotlivé druhy zařízení se požadují (např. podle doporučení CIGRE) různé minimální hodnoty Sd<sub>pi</sub>. Pro zařízení vývodů rozveden jsou to řádově stovky až tisíce let a pro napájecí transformátory 110 kV/vn jsou to desetitisíce let. Jiné hodnoty Sd<sub>pi</sub> se požadují pro systém jako celek. Za přiměřenou se považuje hodnota Sd<sub>pi</sub> systému v rozmezí 100 až 1000 let v závislosti na rozsahu sledovaného systému. Např. pro jeden vývod vedení zaústěného do rozvodny je požadována hodnota tisíce let, zatímco pro celou rozvodnu je přiměřená hodnota stovek let.

Dále se vyhodnotí vyváženost ochrany uvnitř systému, tzn. zda nejsou velké rozdíly mezi Sd<sub>pi</sub> srovnatelných zařízení. Zvolí se taková varianta ochrany, u níž jsou vyvážená Sd<sub>pi</sub> uvnitř systému a celková Sd<sub>pi</sub> nepřekračuje limit.

### **A.3.5 Výpočet střední doby mezi překročeními tepelné kapacity omezovačů**

Obdobně se na modelu posuzované konfigurace vypočte, pro jaké parametry blesku dojde k překročení tepelné kapacity omezovačů přepětí. Zjistí se četnost výskytu

těchto parametrů blesku v dané konfiguraci vedení a chráněných zařízení a tím i četnost překročení tepelné kapacity omezovačů. Pokud vyjde poruchovost omezovačů v daném zapojení nepřiměřeně vysoká, zvolí se omezovače s vyšší schopností absorbovat energii blesku tzn. vyšší třídou vybití a jmenovitým výbojovým proudem, nebo se navrhnu podpůrná ochranná opatření a provede se opakovaný výpočet na modelu s těmito opatřeními.

### **A.3.6 Přepětí nepřímých úderů (indukovaná přepětí)**

Úder blesku do země nebo do konstrukce v blízkosti vedení indukuje ve vedení přepětí, které může ve výjimečných případech také překročit redukovanou izolační hladinu zařízení 110 kV ( $RIH = 550 \text{ kV}/1,2 = 458 \text{ kV}$ ). Indukovaná přepětí se liší ve fázových vodičích v závislosti na jejich výšce a vzdálenosti k zemnicímu lanu. Indukovaná přepětí mají podstatně menší velikost a energii než přepětí při přímých úderech a v sítích 110 kV nejsou nebezpečná pro zařízení chráněná omezovači, pouze velmi výjimečně způsobují přeskoky na vedení.

## **A.4 Koordinace izolace zařízení sítí**

Koordinace izolace je proces volby izolačních hladin zařízení sítě vvn a volby ochranných opatření založený na znalosti charakteristik přepětí v síti a na znalostech výdržných charakteristik izolace zařízení, jehož výsledkem je dosažení požadované výpadkovosti a poruchovosti zařízení a její vyváženosti ve sledované části systému při minimálních nákladech na provedená opatření. Vychází se přitom ze statistického charakteru přepětí v síti a z výpočtů četnosti výskytu parametrů přepětí kritických ve vztahu k izolačním hladinám zařízení.

Snížení poruchovosti je možné dosáhnout:

### **1. Zvýšením izolační hladiny zařízení**

Je to nejnákladnější způsob koordinace a málo účinný, protože při vysokých hodnotách atmosférických přepětí v síti vůči izolačním hladinám zařízení 110 kV se zvýšení izolačních hladin zařízení projeví jen malým snížením jejich poruchovosti.

### **2. Snížením velikosti přepětí nebo jeho četnosti v síti vhodnými opatřeními**

Aby se dosáhlo snížení přepětí v síti jako celku, je nutno aplikovat opatření (zemnicí lana, odpory uzemnění stožárů, omezovače) v celé síti, což je velmi nákladné a přitom ne zcela účinné pro snižování výpadkovosti.

### **3. Snížením přepětí v místech zařízení vhodnou kombinací ochranných opatření a pomocí omezovačů přepětí.**

Aplikace omezovačů přepětí jako lokální ochrany zařízení je nejúčinnějším způsobem zajištění přiměřeně nízké poruchovosti zařízení vvn sítí ovšem s malým vlivem na výpadkovost vedení.



Přítom je efektivní kombinovat ochranu omezovači s doplňkovými opatřeními nebo dodržováním určitých zásad, zajišťujících nízkou úroveň a energii přepětí přicházejících z vedení na chráněné zařízení.

Proto se pro účely koordinace izolace a optimalizace ochrany proti atmosférickému přepětí v sítích vvn používají různé metody výpočtů kombinované se statisticky zpracovanými daty o blescích. Pro analýzu přepětí se používají počítačové programy simulující elektromagnetické jevy v kovových strukturách – např. program EMTP.

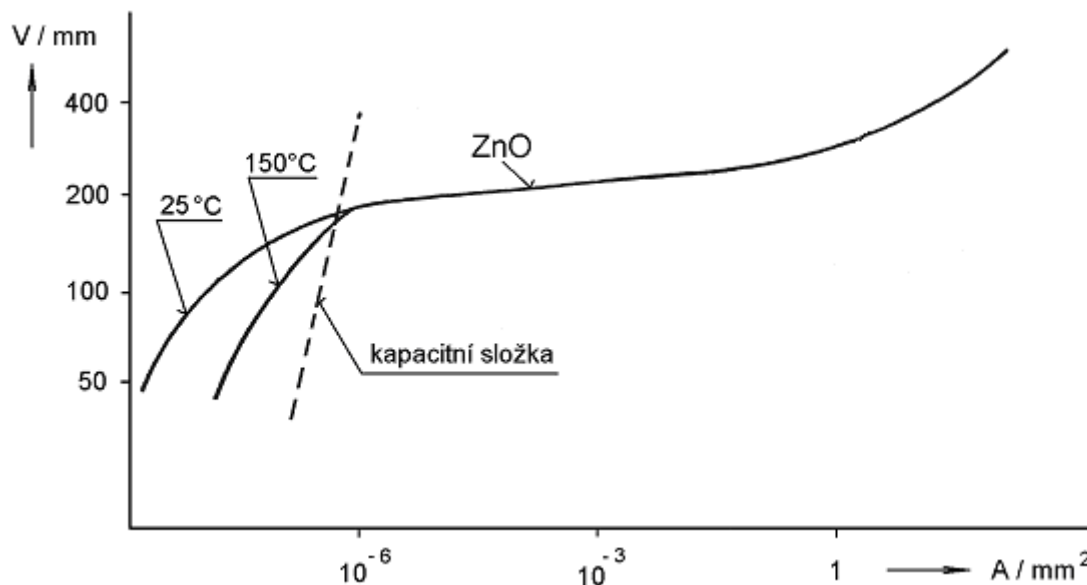
## **B OCHRANNÉ VLASTNOSTI RŮZNÝCH TYPŮ SVODIČŮ PŘEPĚTÍ**

### **B.1 Hrotová jiskřiště**

Hrotové jiskřiště je nejjednodušší přepět'ové ochranné zařízení sestávající ze dvou kovových elektrod s definovanou vzdušnou vzdáleností (doskokem) a zhotovených z materiálu odolného proti zkratovým proudům. Přeskokové napětí hrotového jiskřiště s pevně nastaveným doskokem je tím vyšší, čím vyšší je strmost nárůstu přepětí (závislost přeskokového napětí na strmosti přepětí se nazývá rázová charakteristika). Při velmi strmých přepětích např. při blízkých úderech blesku do vedení je přeskokové napětí hrotového jiskřiště tak velké, že může dojít k průrazu vnitřní izolace chráněného zařízení. Druhou nevýhodou jiskřišť je, že nemají schopnost zhášení následného zkratového proudu a ten musí být vypnut ochranou. Zapůsobení ochranného jiskřiště tedy znamená výpadek.

### **B.2 Bezjiskřišť'ové omezovače přepětí**

Bezjiskřišť'ové omezovače přepětí sestávají ze sloupce bloků nelineárních odporů ZnO. Bloky ZnO mají nelineární VA charakteristiku zobrazenou v semilogaritmickém grafu na obrázku 1. Napětí bloku vztažené na 1 mm jeho výšky je zde znázorněno v závislosti na proudu procházejícím 1 mm<sup>2</sup> plochy bloku v kolmém řezu. V grafu je také znázorněna kapacitní složka proudu, která v oblasti malých proudů převažuje.



Obrázek B1 VA charakteristika bloku ZnO

Při provozním napětí jsou bloky ZnO zavřené a protéká jimi kapacitní proud řádu 1 mA a činná složka proudu je několik desítek  $\mu\text{A}$ . V grafu je znázorněna i poměrně velká závislost proudu na teplotě v oblasti malých provozních proudů. Zvyšuje-li se napětí, začne se blok (hmotový polovodič) otvírat a proud tekoucí omezovačem narůstá mnohem rychleji než přiložené napětí. Ve střední části lze nelinearitu VA charakteristiky vyjádřit vztahem mezi napětím a proudem  $I = AU^B$ , kde exponent B u kvalitních bloků je vyšší než 50, typicky  $B = 51$ . Znamená to, že zvýší-li se napětí o 20 %, proud naroste více než o 4 řády, např. ze 100 mA na 1 kA. Při proudech nad 1 kA se nelinearita otvírání bloků omezovače zmenšuje a proud již neroste tak rychle s rostoucím napětím. Největší využití omezovače k ochraně proti přepětí je ve střední části VA charakteristiky s proudy 1 A až 10 kA, kde je nelinearita největší. Nelinearita VA charakteristik (tzn. tvar křivky) je u různých typů bloků různá:

- je dána zejména vlastnostmi polovodiče ZnO. Čím je blok kvalitnější, tím větší je jeho nelinearita, a tím je VA křivka plošší a blok plní lépe funkci přepětí ochrany (různí výrobci dosahují různé hodnoty nelinearity).

- omezovače vyšší energetické třídy (s větší plochou bloků v kolmém řezu) mají plošší křivku než omezovače nižší třídy

Ve střední a horní části charakteristiky bloky ZnO snesou pouze impulsní zátěž, protože na rozdíl od ochranných jiskříšť a bleskojistek omezovače absorbují celou energii přepětí. (Na ochranných jiskříštích po zapálení klesne napětí téměř na nulu a energie přepětí se částečně odrazí do sítě a částečně rozptýlí do země. Na bleskojistce po zapálení napětí klesne na hodnotu napětí bloků SiC a část energie pohltí bloky, část se odrazí do sítě a část se rozptýlí v zemi).

Výhodou bloků ZnO je, že reagují na přepětí téměř okamžitě a proud začne protékat v čase několik desítek ns. Pro vyšší strmosti přepětí je na omezovači stejně jako u bleskojistky vyšší napětí, ale tento nárůst je mnohem menší než u bleskojistky, tzn.

že rázová charakteristika omezovače je mnohem plošší a je dána víceméně indukčností sloupce bloků.

### B.3 Omezovače přepětí s jiskřišti

Sestávají ze sériové kombinace jiskřiště a sloupce bloků ZnO. Bloky ZnO se dimenzují stejně jako u bezjiskřišťového omezovače. Po překročení určité hladiny přepětí a po sepnutí jiskřiště je funkce omezovače stejná jako funkce bezjiskřišťového omezovače. Omezovačem s jiskřištěm při provozním napětí neteče svodový proud a není namáhán dočasnými přepětími, tím se zvyšuje jeho životnost. Nevýhodou je strmější rázová charakteristika než u omezovačů bezjiskřišťových.

### B.4 Porovnání bezjiskřišťových omezovačů přepětí

U bezjiskřišťových omezovačů vvn se při jeho volbě historicky jako hlavní parametr udává jmenovité napětí omezovače  $U_r$ , které zpočátku znamenalo efektivní napětí 50 Hz, které omezovač vydrží po určitou omezenou dobu (1 s). Není tomu tak u omezovačů vn, u nichž se při volbě jako hlavní parametr udává trvalé provozní napětí  $U_c$ . Mezi  $U_r$  a  $U_c$  je poměr cca 10 : 8. Dnes kromě  $U_r$  udávají výrobci zvlášť výdržná napětí 50 Hz ( $U_{TOV}$ ), protože dosahují lepších hodnot.

Pro posouzení ochranné funkce omezovače určitého výrobce a typu je důležité kromě základních parametrů, jako je jmenovité napětí omezovače  $U_r$  a jmenovitý proud  $I_n$ , znát parametry  $U_{res}$  -zbytková napětí omezovače, která určují tzv. ochrannou hladinu omezovače (čím je nižší, tím lepší) a na druhé straně max. přípustné dočasné přepětí  $U_{TOV}$  pro jeho trvání 1 s nebo 10 s (čím vyšší, tím lepší). Porovnáváme-li různé typy, musí být porovnáváno napětí  $U_{res}$  pro stejný tvar a velikost proudu, např. 8/20  $\mu$ s a 10 kA, a maximální přípustné dočasné přepětí  $U_{TOV}$  pro stejnou dobu jeho trvání např. 10 s.

## C VOLBA JMENOVITÉHO NAPĚTÍ $U_r$

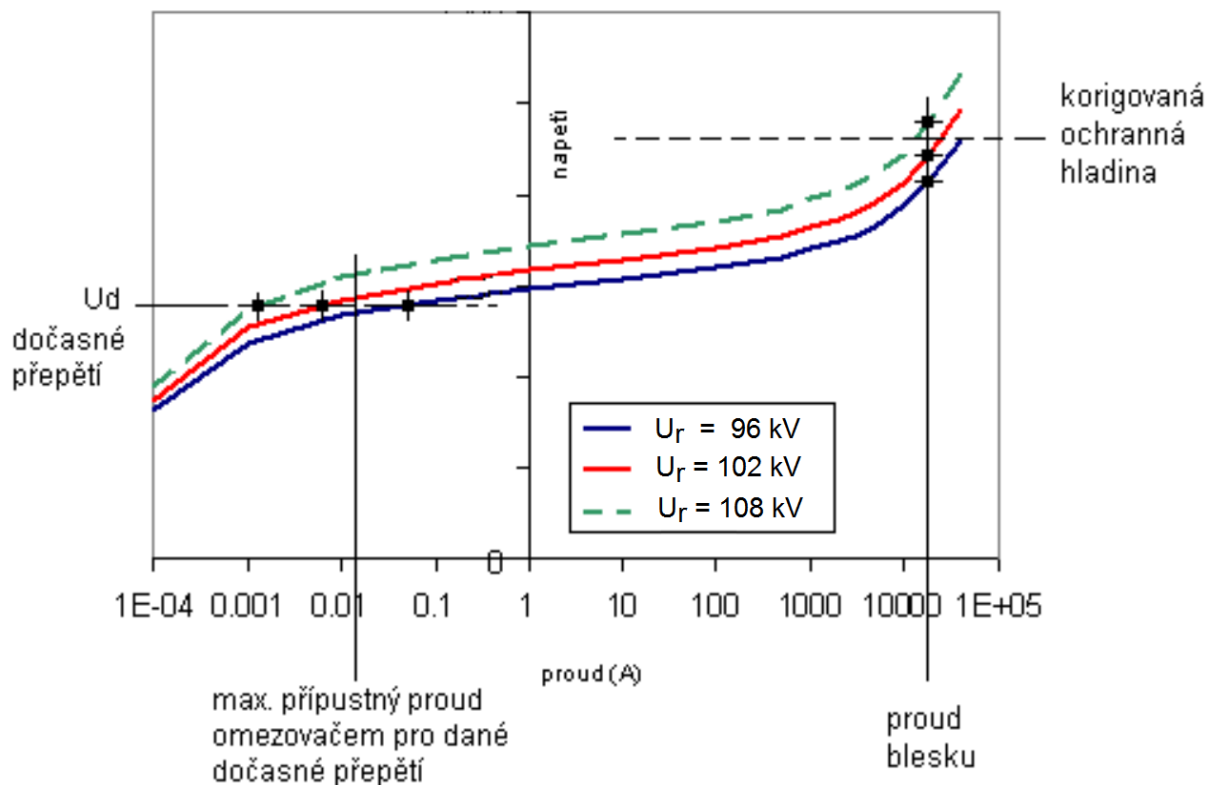
Jmenovité napětí omezovače  $U_r$  ( i trvalé provozní napětí omezovače  $U_c$  ) je úměrné výšce sloupce bloků stejně jako všechny ostatní napěťové parametry a celá VA charakteristika omezovače. Naopak volbou určité hodnoty napětí  $U_r$  ( $U_c$ ) se volí všechny napěťové parametry včetně ochranné hladiny omezovače pro impulsní přepětí, znázorňuje to obrázek B2.

Nesprávná volba napětí  $U_r$  omezovače může mít negativní vliv na jeho funkci a tím také na spolehlivost dodávky dvojím způsobem:

- Pokud se zvolí nízké  $U_r$ , budou ochranná hladina  $U_{res}$  a s ní i riziko poruchy chráněného zařízení příznivě nízké. Na druhé straně ale bude vyšší riziko tepelného namáhání omezovačů dočasnými přepětími, takže pravděpodobnost jejich poruchy bude vysoká.

- Pokud se zvolí vysoké  $U_r$ , bude riziko poruchy omezovačů z důvodu dočasných přepětí bezvýznamné, ale vysoká ochranná hladina  $U_{res}$  bude znamenat vyšší pravděpodobnost zničení chráněných zařízení.

Správná volba trvalého provozního napětí  $U_r$  omezovačů by měla znamenat optimální parametry ochrany, tedy vyvážené riziko ohrožení spolehlivosti dodávky z obou příčin.



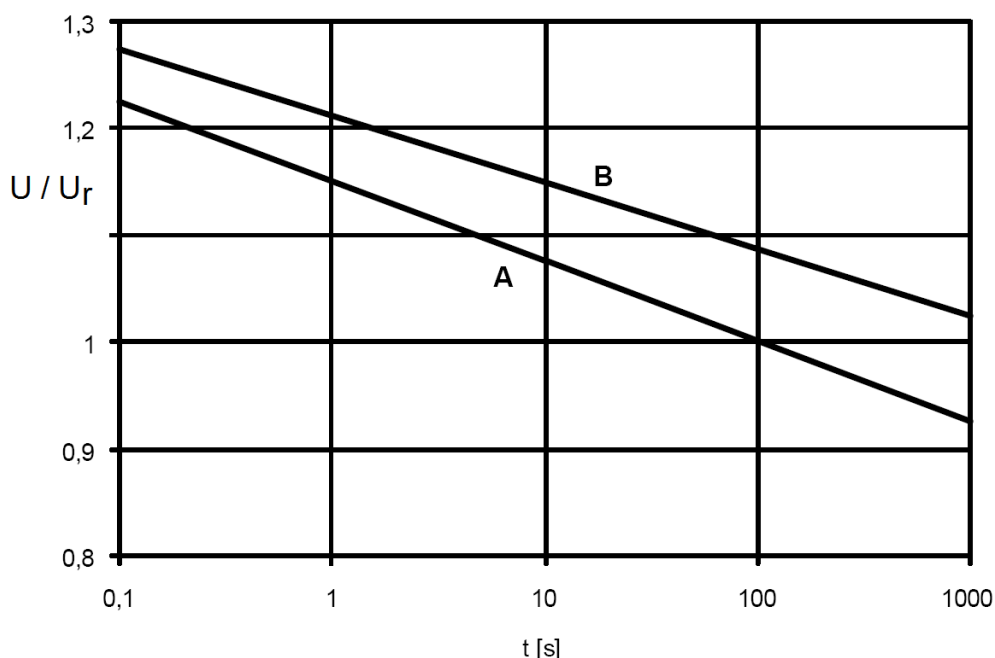
**Obrázek B2 - Vzájemná závislost parametrů omezovače přepětí**

Parametry ochrany lze zlepšit:

- výběrem omezovačů s plošší VA charakteristikou (kvalitnější bloky, vyšší třída),
- připojováním omezovačů co nejbližší k chráněnému zařízení co nejkratšími propojovacími vodiči

Při volbě jmenovitého napětí  $U_r$  a trvalého provozního napětí omezovače  $U_c$  je určující tepelné namáhání omezovače při dočasných přepětích vyskytujících se během provozu a v mimořádných provozních stavech. Obecně se postupuje tak, že se nejprve vyšetří, jaká dočasná přepětí s jakou velikostí a po jakou dobu budou tepelně namáhat omezovače přepětí v daném místě sítě a zapojení. Určí se nejhorší kombinace dočasných přepětí, která se mohou vyskytnout současně nebo v krátkém časovém intervalu. Pro každou složku se určí velikost napětí a doba jeho působení na omezovač.

Tepelné účinky dočasných přepětí jsou úměrné součinu napětí, proudu procházejícího omezovačem a času. Jak bylo uvedeno, proud tekoucí omezovačem je úměrný přibližně 51. mocnině napětí. Proto tepelné účinky jsou též úměrné této mocnině. Pro každou složku dočasného přepětí se vypočte její tepelný účinek, tepelné účinky jednotlivých složek se sečtou a pro součtový tepelný účinek se vypočte takové napětí, které by tento tepelný účinek způsobilo za dobu 10 sekund (tzv. desetisekundové napětí  $U_{10s}$ ). Výrobce udává v technické dokumentaci omezovače přípustné  $U_{10s}$  buď číselně, nebo graf závislosti přípustného dočasného přepětí (jako násobku  $U_r$  nebo násobku  $U_c$ ) na době jeho působení, ve kterém lze tuto hodnotu nalézt. V těchto grafech jsou zakresleny zpravidla dvě závislosti: A – přípustné přepětí bez předchozí absorpce energie impulsu a B – s předcházející absorpcí energie impulsu. Příklad takového grafu je na obrázku B3. Z hlediska dočasných přepětí musí omezovač vystavený působení atmosférických přepětí vyhovět podle závislosti B, protože dočasná přepětí mohou nastat právě po úderu blesku, jehož energii omezovač absorboval.



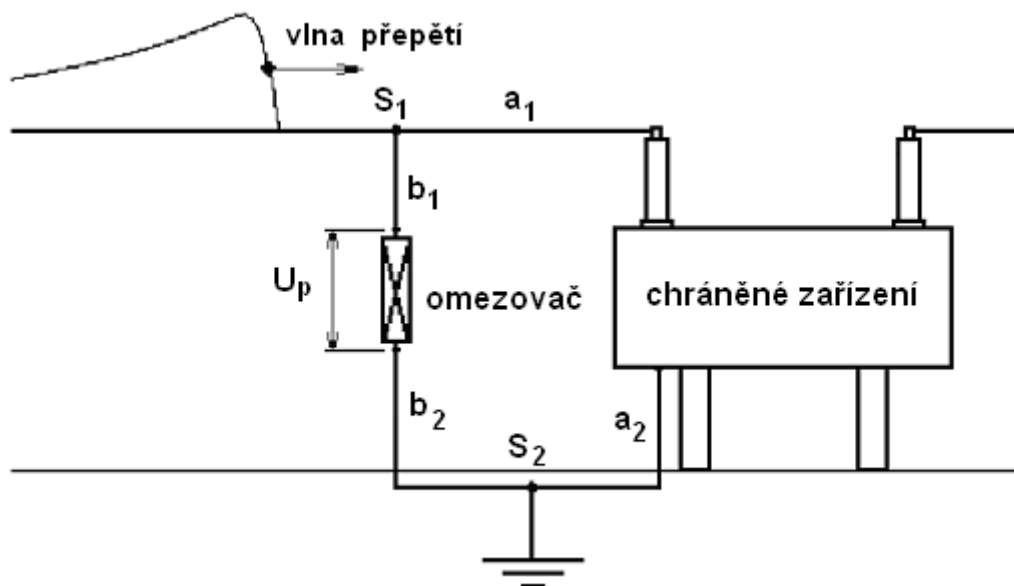
**Obrázek B3 - Velikost přípustného dočasného přepětí  $U$  (v poměru k  $U_r$ ) v závislosti na době jeho trvání  $t$ .**

## D Připojování omezovačů všeobecně

Omezovač přepětí omezuje přepětí na hodnotu napětí  $U_p$ , které se nazývá ochranná hladina omezovače.

Ochranná hladina omezovače  $U_p$  je napětí na jeho svorkách, při daném tvaru a vrcholové hodnotě procházejícího proudu. Určité hodnoty napětí charakterizující ochrannou hladinu omezovače lze vyčíst z katalogových údajů výrobců – jsou to tzv. reziduální neboli zbytková napětí omezovače  $U_{res}$  pro různé velikosti impulsních proudů a jejich tvary.

Na obrázku B4 je schéma připojení omezovače k chráněnému zařízení. Vlna přepětí přichází po vedení do bodu  $S_1$  a zde se dělí a pokračuje jednak po vodiči  $a$  k zařízení, jednak po vodiči  $b$  k omezovači. Od zařízení, které může mít pro impulsní přepětí vysokou impedanci se přepětí odrazí se stejnou polaritou a vznikne kladný rozdíl přepětí  $\Delta U_a$  mezi zařízením a bodem  $S_1$ . Od omezovače, který tvoří zkrat pro přepětí převyšující  $U_p$  se přepětí odrazí s opačnou polaritou a vznikne záporný rozdíl přepětí  $-\Delta U_b$  mezi omezovačem a bodem  $S_1$ . Celkový rozdíl napětí mezi omezovačem a chráněným zařízením se rovná hodnotě  $\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_b$ . O tento rozdíl je přepětí na zařízení vyšší než na svorkách omezovače.



**Obrázek B4 - Jednopolové schéma ochrany s vyznačením úseků vodiče  $a$  a vodiče  $b$**

Na vodiči  $b$  vzniká zhruba 2x až 3x větší rozdíl impulsního přepětí než na vodiči  $a$ . Je to tím, že vodičem  $b$  na rozdíl od vodiče  $a$  navíc protéká velký impulsní bleskový proud řádu kA s velkou strmostí nárůstu a tak na vodiči  $b$  vzniká reaktanční úbytek přepětí. Proto je důležité, aby vodič  $b$  měl co nejmenší indukčnost (dostatečný průřez) a byl co nejkratší.

Do délky vodiče  $b$  je nutné započítat jak délku vodiče  $b_1$  mezi bodem připojení  $S_1$  a vvn elektrodou omezovače, tak délku vodiče  $b_2$  mezi spodní elektrodou omezovače a bodem  $S_2$ , kde se spojuje uzemnění omezovače a chráněného zařízení:  $b = b_1 + b_2$ .

Do délky vodiče  $a$  se započítává jak délka vodiče  $a_1$  mezi bodem připojení  $S_1$  a vvn svorkou chráněného zařízení, tak délka vodiče  $a_2$  mezi uzemňovací svorkou chráněného zařízení a bodem  $S_2$ , kde se spojuje uzemnění omezovače a chráněného zařízení:  $a = a_1 + a_2$ .

Pokud je součástí vodičů  $a_2$  nebo  $b_2$  příhradová nebo jiná rozměrná kovová konstrukce, její délka se nezapočítává - to platí i pro mřížovou uzemňovací síť.

## D.1 Obecně platná pravidla pro připojování

Z uvedené charakteristiky vyplývají tři pravidla, která lze při ochraně v sítích vvn uplatnit obecně:

1. Omezovače přepětí a zařízení, které má být chráněno, musí být uzemněny na společný systém uzemnění. Galvanické propojení mezi uzemňovacími svorkami omezovačů a uzemněním chráněného zařízení musí být co nejkratší.
2. Celková délka vodičů  $\underline{a}$  a  $\underline{b}$  připojení omezovačů k chráněnému zařízení musí být co nejkratší.
3. Vždy se doporučuje, aby vodič  $\underline{b}$  byl co nejkratší, nebo alespoň kratší než vodič  $\underline{a}$ .

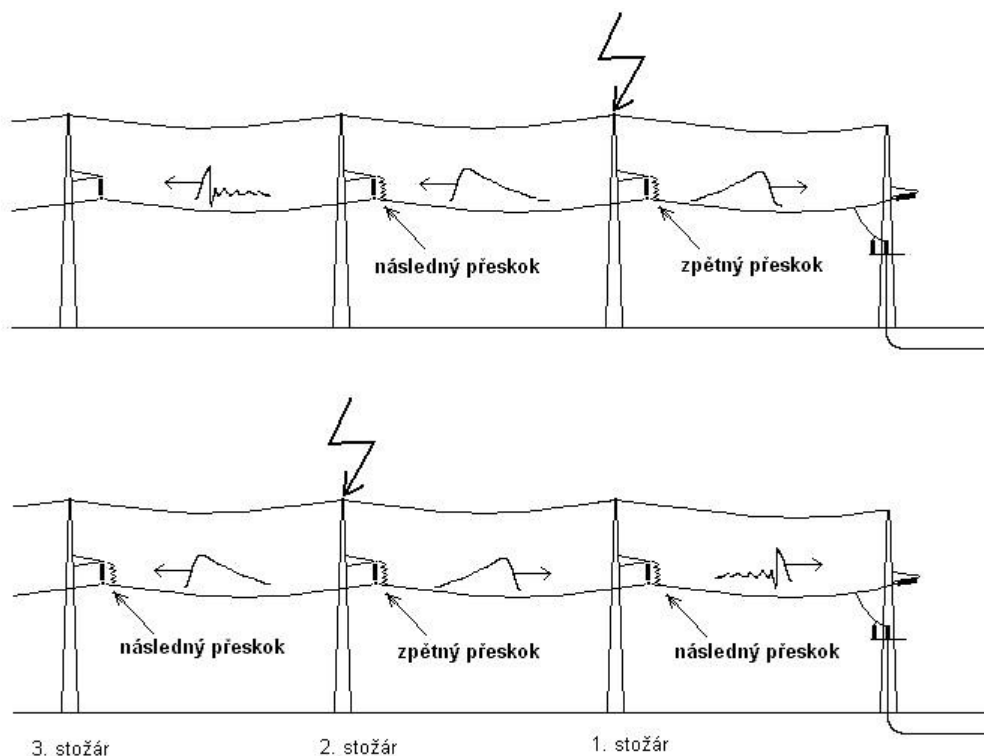
## D.2 Ochranný dosah omezovače

Zařízení je v ochranném dosahu omezovače, pokud pro zvolený případ nejnepříznivějšího přepětového namáhání přepětí na zařízení nepřekročí izolační výdržnou hladinu zařízení.

Ochranný dosah neboli ochranná vzdálenost omezovače přepětí je různá v různých konfiguracích chráněných zařízení a nelze ji stanovit jednotně.

## D.3 Vliv místa úderu na přepětí ve vloženém kabelovém úseku při ZP

Obrázek B.5 ilustruje rozdíl přepětí při ZP na prvním a druhém stožáru. Při ZP na 1. stožáru jde na omezovač plná vlna s velkou energií. Při ZP na 2. stožáru plná vlna přebíhá 1. stožár, kde dojde k následnému přeskoku a vlna ztratí většinu své energie a tím „ušetří“ omezovač před absorpcí energie plné vlny.



**Obrázek B5 Úder blesku se ZP do 1. a 2. stožáru s následnými přeskoky na sousedních stožárech**

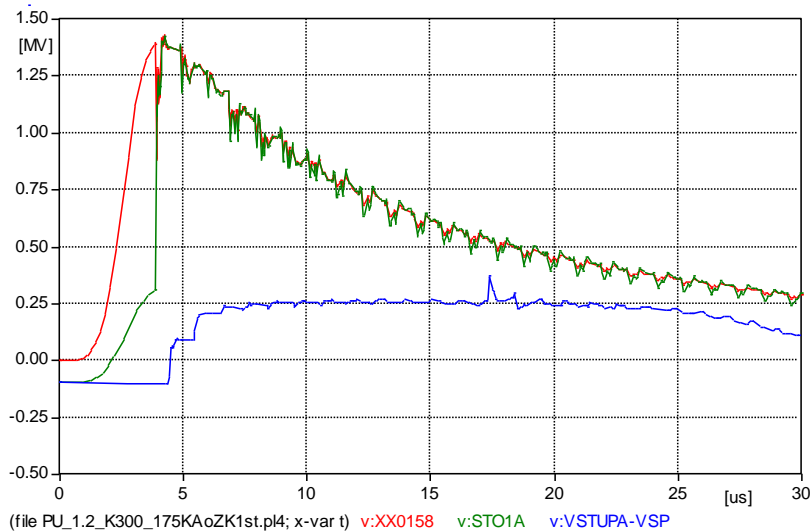
#### **D.4 Porovnání přepětí v kabelovém úseku při ZP na vedení s jedním a dvěma zemnicími lany**

Z hlediska vzniku a parametrů zpětných přeskoků je příznivý účinek dvou zemnicích lan trojí:

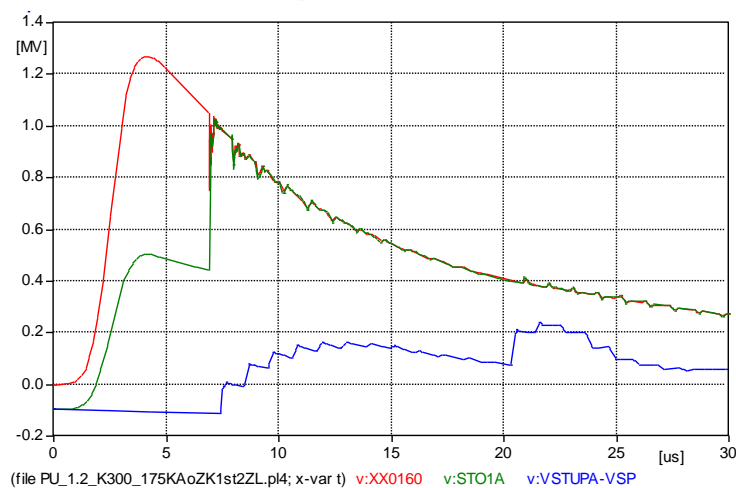
- nižší celková vlnová impedance zemnicích lan způsobí větší odvod proudu blesku zemnicími lany, a tím pádem i nižší vrcholovou hodnotu přepětí na stožáru:  $\Rightarrow$  ke vzniku ZP je tím pádem nutný blesk s větším proudem, který je méně četný,
- dvě zemnicí lana mají větší magnetickou vazbu na fázové vodiče než jedno. Při celkově větším impulsním proudu tekoucím zemnicími lany od místa úderu to znamená vyšší indukované napětí ve fázových vodičích a tím pádem to znamená další snížení rozdílu přepětí na izolátorových závěsích  $\Rightarrow$  ke vzniku ZP je i z tohoto důvodu nutný blesk s větším proudem, který je méně četný,
- pokud na vedení se dvěma zemnicími lany přesto k ZP dojde, je to většinou při menším přeskokovém napětí (v týle impulsu) a přepětí, které se šíří po vedení a které vstupuje do kabelu je nižší.

Porovnání obou případů je na obrázcích B6 a B7, kde jsou časové průběhy ZP na izolátorovém závěsu u 1. stožáru od přechodu do kabelu pro jedno zemnicí lano (obr. 7) a 2 zemnicí lana (obr. 8) pro úder blesku s proudem 175 kA (odpor uzemnění stožárů je 10  $\Omega$ ). Na fázovém vodiči je okamžitá hodnota provozního napětí - 98 kV. Kabel je chráněn omezovači přepětí z obou stran.





**Obrázek B.6 Zpětný přeskok, kabel 1200 m, 300 mm<sup>2</sup>, ZP 175 kA, úder do 1.stožáru (150 m), 1 zemnicí lano v 1. a 2. rozpětí (a v dalších rozpětích) - červeně napětí na stožáru s úderem, zeleně napětí fázového vodiče, modře - napětí v kabelu**



**Obrázek 7 Zpětný přeskok, kabel 1200 m, 300 mm<sup>2</sup>, ZP 175 kA, úder do 1.stožáru(150 m),2 zemnicí lana v 1. a 2. rozpětí -červeně napětí na stožáru s úderem, zeleně napětí fázového vodiče, modře - napětí v kabelu**

U vedení s jedním zemnicím lanem dosáhne přepětí na konzoli stožáru hodnoty 1,38 MV, na fázovém vodiči je indukovaná složka napětí cca 300 kV a k ZP dojde těsně před vrcholem impulsního přepětí stožáru při přepětí na závěsu cca 1 MV. Přepětí na začátku kabelu je v tomto případě 260 kV se špičkou 370 kV.

V případě stejného úderu do vedení se dvěma zemnicími lany v 1. a 2. rozpětí dosáhne přepětí na konzoli stožáru hodnoty 1,27 MV, na fázovém vodiči je indukovaná složka napětí cca 500 kV a k ZP dojde v tylu impulsního přepětí stožáru při přepětí na závěsu cca 600 kV. Přepětí na začátku kabelu je v tomto případě 230 kV.