

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

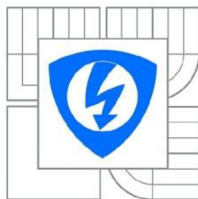
TESTOVÁNÍ SVODIČŮ PŘEPĚTÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ CHRÁSTECKÝ

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Lukáš Chrástecský

ID: 136523

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Testování svodičů přepětí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Přepětí v elektrických sítích
2. Ochrana proti nepříznivým účinkům přepětí
3. Standardy pro svodiče a jejich testování

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

CHRÁSTECKÝ, L. *TESTOVÁNÍ SVODIČŮ PŘEPĚTÍ*. BRNO: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ, 2014. 48 s. VEDOUcí BAKALÁŘSKÉ PRÁCE DOC. ING. PETR TOMAN, PH.D..

PODĚKOVÁNÍ A PROHLÁŠENÍ

Rád bych zde poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Petru Tomanovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace (na kterých jsem se vždy dozvěděl to, co jsem potřeboval a ještě něco užitečného navíc) a za velmi rychlou a kvalitní komunikaci. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Michalu Krbalovi za ochotu, umožnění přístupu do laboratoří, za obrovskou trpělivost (ne jen se mnou, ale i s technikou), cenné rady a zkušenosti. Na závěr bych chtěl poděkovat rodičům, bez jejichž podpory a pomoci bych nemohl studovat na vysoké škole a tím pádem se rozvíjet v oboru, který mě baví.

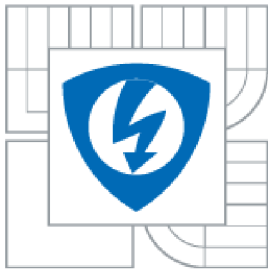
Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících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

V Brně dne.....

Podpis autora.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

TESTOVÁNÍ SVODIČŮ PŘEPĚTÍ

TESTING OF SURGE ARRESTERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ CHRÁSTECKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR TOMAN, Ph.D.

BRNO 2014

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou přepětí v elektrických sítích, možnými ochranami před účinky přepětí a problematikou testování svodičů přepětí. První část práce je zaměřena na problematiku přepětí v elektrických sítích, jsou zde popsány různé druhy přepětí, jak se projevují a jejich vlastnosti. Druhá část práce se zaměřuje na možné druhy ochrany před nepříznivými vlivy přepětí, jejich rozdělení, vlastnosti a možnosti použití. Závěr práce je věnován standardům svodičů přepětí a samotnému testování svodičů přepětí, na konec následuje návrh laboratorní úlohy na testování svodičů přepětí.

KLÍČOVÁ SLOVA: přepětí v elektrických sítích; svodiče přepětí; standardy svodičů přepětí; testování svodičů přepětí; Haefely impulzní generátor

ABSTRACT

This work deals with voltage surges in electrical grids, overvoltage protection and testing of surge arresters. The first part of thesis is focused on the issue of overvoltage impulses caused by different sources and their description. The next part of the thesis deals with surge arresters and it is focused on their classification, attributes and possible applications. The last part of the work describes standards and testing of surge arresters. Thesis includes a scheme of laboratory exercise for testing of a surge arresters.

KEY WORDS: surges in electrical grids; surge arresters; standards of surge arresters; testing of surge arresters; Haefely pulse generator

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD.....	12
2 CÍL PRÁCE.....	13
3 PŘEPĚTÍ V ELEKTROENERGETICKÝCH SOUSTAVÁCH	14
3.1 SPÍNACÍ PŘEPĚTÍ.....	16
3.1.1 PŘEPĚTÍ PŘI VYPÍNÁNÍ ZKRATŮ	17
3.1.2 PŘEPĚTÍ PŘI VYPÍNÁNÍ MALÝCH INDUKTIVNÍCH PROUDŮ.....	19
3.1.3 PŘEPĚTÍ PŘI SPÍNÁNÍ KAPACITNÍCH PROUDŮ	19
3.2 ATMOSFÉRICKÉ PŘEPĚTÍ.....	20
3.2.1 PŘEPĚTÍ PŘI PŘÍMÉM ZÁSAHU BLESKU DO VEDENÍ	20
3.2.2 PŘEPĚTÍ INDUKOVANÁ BLESKEM VE VEDENÍ.....	20
3.2.3 BUDOVY A PŘEPĚTÍ V NICH ZPŮSOBENÉ BLESKEM	20
3.3 JINÉ DRUHY PŘEPĚTÍ	21
3.3.1 ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ	21
3.3.2 NUKLEÁRNÍ ELEKTROMAGNETICKÝ IMPULZY	21
4 PŘEPĚŤOVÉ OCHRANY	22
4.1 OCHRANA VEDENÍ PROTI NEPŘÍZNIVÝM ÚČINKŮM BLESKU	23
4.2 SVODIČE PŘEPĚTÍ.....	23
4.2.1 OCHRANNÉ (KOORDINAČNÍ) JISKŘIŠTĚ.....	23
4.2.2 VYFUKOVACÍ BLESKOJISTKY	24
4.2.3 SVODIČE PŘEPĚTÍ S NELINEÁRNÍMI ODPORY	24
4.2.4 SVODIČE PŘEPĚTÍ PRO OCHRANU VNITŘNÍCH ELEKTRICKÝCH ROZVODŮ A ZAŘÍZENÍ	29
5 STANDARDY SVODIČŮ PŘEPĚTÍ BEZ JISKŘIŠŤ (OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ)	30
5.1 OZNAČOVÁNÍ OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ	30
5.2 KLASIFIKACE OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ.....	30
5.3 NORMALIZOVANÉ HODNOTY NAPĚTÍ	31
5.4 NORMALIZOVANÉ KMITOČTY	31
5.5 NORMALIZOVANÉ JMENOVITÉ PROUDY	31
5.6 PROVOZNÍ PODMÍNKY.....	31
5.6.1 NORMÁLNÍ PROVOZNÍ PODMÍNKY	31
5.6.2 ZVLÁŠTNÍ PROVOZNÍ PODMÍNKY	31
5.7 POŽADAVKY KLADENÉ NA OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ	32
5.7.1 VÝDRŽNÉ IZOLAČNÍ HODNOTY PLÁŠTĚ OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ	32
5.7.2 REFERENČNÍ NAPĚTÍ	32
5.7.3 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ	32
5.7.4 VNITŘNÍ ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	32
5.7.5 MÍRA NETĚSNOSTI	32
5.7.6 ROZDĚLENÍ PROUDU U VÍCESLOUPCOVÉHO OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ.....	32

5.7.7	TEPELNÁ STABILITA.....	33
5.7.8	ODOLNOST PŘI DLOUHÉM IMPULZU PROUDU.....	33
5.7.9	PROVOZNÍ FUNKCE	33
5.7.10	ZÁVISLOST STRÍDAVÉHO NAPĚTÍ PŘILOŽENÉHO NA OMEZOVAČ PŘEPĚTÍ NA ČASE	33
5.7.11	ZKRAT.....	33
5.7.12	ODPOJOVAČ	33
5.7.13	POŽADAVKY NA POMOCNÁ ZAŘÍZENÍ JAKO JSOU ŘÍDÍCÍ SOUČÁSTI.....	34
5.7.14	MECHANICKÁ ZATÍŽENÍ.....	34
5.7.15	ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA.....	34
5.7.16	KONEC ŽIVOTNOSTI	34
6	TESTOVÁNÍ SVODIČŮ PŘEPĚTÍ BEZ JISKŘIŠŤ (OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ).....	35
6.1	ZKOUŠKY TYPOVÉ.....	35
6.1.1	VÝDRŽNÉ ZKOUŠKY PLÁŠTĚ OMEZOVAČE PŘEPĚTÍ.....	35
6.1.2	ZKOUŠKY ZBYTKOVÉHO NAPĚTÍ.....	35
6.1.3	VÝDRŽNÁ ZKOUŠKA DLOUHÝM IMPULZEM PROUDU.....	36
6.1.4	ZKOUŠKA PROVOZNÍ FUNKCE	36
6.1.5	ZKRATOVÁ ZKOUŠKA	36
6.1.6	ZKOUŠKA ODPOJOVAČE/INDIKÁTORU PORUCHY (JE-LI SOUČÁSTÍ)	36
6.1.7	MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	36
6.1.8	OHYBOVÝ MOMENT	37
6.1.9	ZKOUŠKY VLIVU PROSTŘEDÍ.....	37
6.1.10	MÍRA NETĚSNOSTI	37
6.1.11	RÁDIOVÉ RUŠENÍ (RIV)	37
6.2	ZKOUŠKY KUSOVÉ	37
6.3	ZKOUŠKY PŘEJÍMACÍ.....	38
6.3.1	NORMALIZOVANÉ ZKOUŠKY.....	38
6.3.2	ZVLÁŠTNÍ ZKOUŠKA TEPELNÉ STABILITY	38
6.4	ZKOUŠKY SPECIÁLNÍ	39
7	NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY NA TESTOVÁNÍ SVODIČŮ PŘEPĚTÍ.....	40
7.1	CÍL ÚLOHY.....	40
7.2	TEORETICKÝ ROZBOR	40
7.3	SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	44
7.4	POSTUP MĚŘENÍ	44
7.5	VYPRACOVÁNÍ.....	46
7.6	ZHODNOCENÍ MĚŘENÍ	46
8	ZÁVĚR.....	47
	POUŽITÁ LITERATURA	48

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Trvalé přepětí [1]</i>	14
<i>Obr. 3-2 Dočasné přepětí [1]</i>	15
<i>Obr. 3-3 Přejchodné přepětí s dlouhým čelem [1]</i>	15
<i>Obr. 3-4 Přejchodné přepětí s krátkým čelem [1]</i>	15
<i>Obr. 3-5 Přejchodné přepětí s velmi krátkým čelem – upraveno autorem [1]</i>	16
<i>Obr. 3-6 Náhradní schéma - vypínání zkratu</i>	17
<i>Obr. 3-7 Průběh zotaveného napětí při vypínání zkratu – upraveno autorem [2]</i>	19
<i>Obr. 4-1 Koordinace ochranné hladiny svodiče a izolační pevnosti chráněného zařízení [2]</i>	22
<i>Obr. 4-2 Schematické zobrazení připojení přepět'ové ochrany</i>	23
<i>Obr. 4-3 Ochranné jiskřiště [3]</i>	23
<i>Obr. 4-4 Torokova trubice - upraveno autorem [5]</i>	24
<i>Obr. 4-5 V-A charakteristiky napět'ově závislých odporů – upraveno autorem [2]</i>	25
<i>Obr. 4-6 Schéma složení ventilové bleskojistky – upraveno autorem [1]</i>	26
<i>Obr. 4-7 Specifická energie v kJ na kV jmenovitého napětí v závislosti na poměru zbytkového napětí při spínacím impulsu U_{res} k efektivní hodnotě jmenovitého napětí U_r omezovače [6]</i> 28	
<i>Obr. 4-8 Omezovač přepětí - upraveno autorem [10]</i>	29
<i>Obr. 7-1 Pohled na řezy svodiče přepětí [10]- upraveno autorem</i>	42
<i>Obr. 7-2 Zapojení pracoviště, jde vidět i konfigurace generátoru – archiv autora</i>	43
<i>Obr. 7-3 Schéma zapojení</i>	44
<i>Obr. 7-4 Prostředí programu GC 257 Impulse – archiv autora</i>	45
<i>Obr. 7-5 Náhled na nastavení teploty a tlaku – archiv autora</i>	45
<i>Obr. 7-6 Výsledek měření zpracovaný graficky</i>	46

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 4-1 Parametry pro zkoušku vybitím vedení pro omezovače přepětí 10 kA a 20 kA [6]</i>	28
<i>Tab. 5-1 Klasifikace omezovačů přepětí</i>	30
<i>Tab. 5-2 Kroky jmenovitých napětí</i>	31
<i>Tab. 6-1 Vrcholové hodnoty proudů pro měření zbytkového napětí při spínacím impulzu</i>	36
<i>Tab. 7-1 Hodnoty uvedené výrobcem v katalogu [10]</i>	42
<i>Tab. 7-2 Tabulka s naměřenými hodnotami</i>	46

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

T_1 [s]	.....	doba čela proudového impulzu
T_2, T_t [s]	.....	doba půltýlu impulzu
t [s]	.....	čas
u_c [V]	.....	zotavené napětí
i [A]	.....	okamžitá hodnota proudu
U [V]	.....	amplituda napětí zdroje
ω [rad*s ⁻¹]	.....	úhlová frekvence zdroje
ω_0 [rad*s ⁻¹]	.....	úhlová frekvence přechodné kmitající složky
f [Hz]	.....	frekvence
U_m [V]	.....	hodnota úbytku napětí vyvolaného průchodem proudem blesku
U_p [V]	.....	ochranná hladina určená ze zbytkových napětí
U_r [V]	.....	jmenovité napětí omezovače
U_c [V]	.....	trvalé provozní napětí
U_{res} [V]	.....	zbytkové napětí omezovače
I_n [A]	.....	jmenovitý výbojový proud omezovače
U_{VOT} [V]	.....	trvalé provozní napětí s ohledem na hodnotu dočasného přepětí
L [H]	.....	indukčnost
C [F]	.....	kapacita
VVN	.....	velmi vysoké napětí
ZnO	.....	oxid zinku
SiC	.....	karbid křemíku

1 ÚVOD

V dnešní době je elektrická energie hojně využívána v průmyslu, ve veřejném sektoru, ale i v soukromém životě všech lidí. Dnes si bez ní nedokážou lidé svůj život představit, setkávají se s elektrickou energií nebo s formou energie, která byla z elektrické energie přeměněna na každém kroku. Elektrická energie je ceněna nejen pro své velice univerzální použití, ale taktéž pro svou poměrně nenáročnou výrobu, relativně jednoduchý transport vyrobené elektrické energie k místu spotřeby, ale taky velká výhoda elektrické energie spočívá v možnosti její přeměny na jinou formu energie, jak už bylo zmíněno, lidé se nesetkávají pravidelně jen s elektrickou energií samotnou, ale i s energií, která vzniká přeměnou energie elektrické.

V dřívějších dobách, asi v první polovině 20. století se elektrická energie využívala většinou k přeměně na mechanickou práci a k osvětlování, takže se jednalo o aplikace, které nebyly až tak citlivé na krátkodobá zvýšení napětí, ovšem za předpokladu, že tyto hodnoty zvýšeného napětí neohrožovaly přímo izolační systémy. V 80. letech, ale nastala z tohoto hlediska úplně nová situace a to protože se začala zavádět výpočetní technika do řídicích a informačních systémů a to jak v rámci elektroenergetické soustavy, tak i mimo ni [1]. Proto je třeba tomuto negativnímu vlivu zvýšeného napětí (přepětí) v elektroenergetické soustavě věnovat pozornost a řešit možnosti potlačení tohoto vzniklého přepětí, dále je důležité vědět něco o zařízeních, které k této ochraně proti přepětí v síti slouží a jaké jsou na ně kladeny nároky. A právě tímto se bude tato práce zabývat v teoretické části a praktická část bude věnována samotnému otestování vybraného svodiče přepětí.

2 CÍL PRÁCE

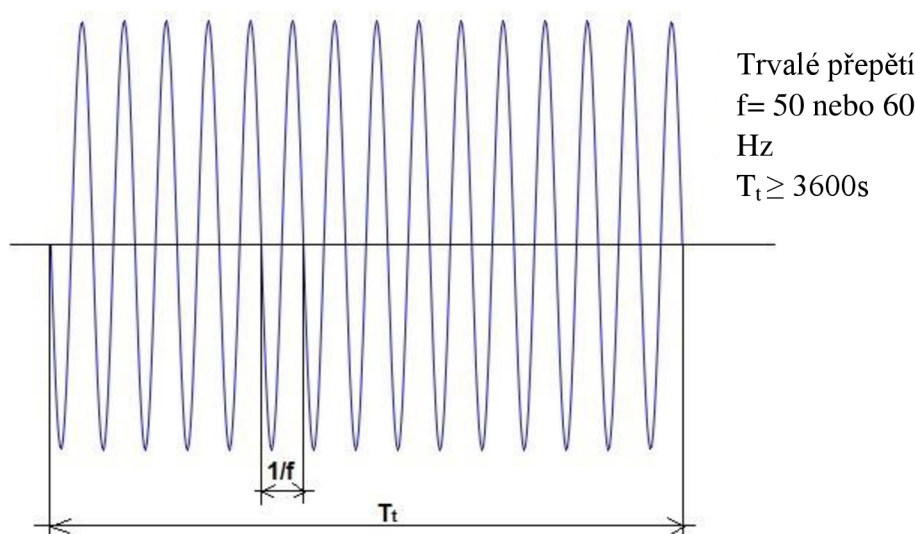
Cílem této práce je teoreticky popsat problematiku přepětí v elektrických sítích, dále popsat možnosti ochrany před přepětím – přepět'ové ochrany, jejich rozdělení a vlastnosti. Rozebrat teoreticky standardy pro svodiče přepětí a testování svodičů, realizovat návrh laboratorní úlohy na testování svodičů přepětí.

3 PŘEPĚTÍ V ELEKTROENERGETICKÝCH SOUSTAVÁCH

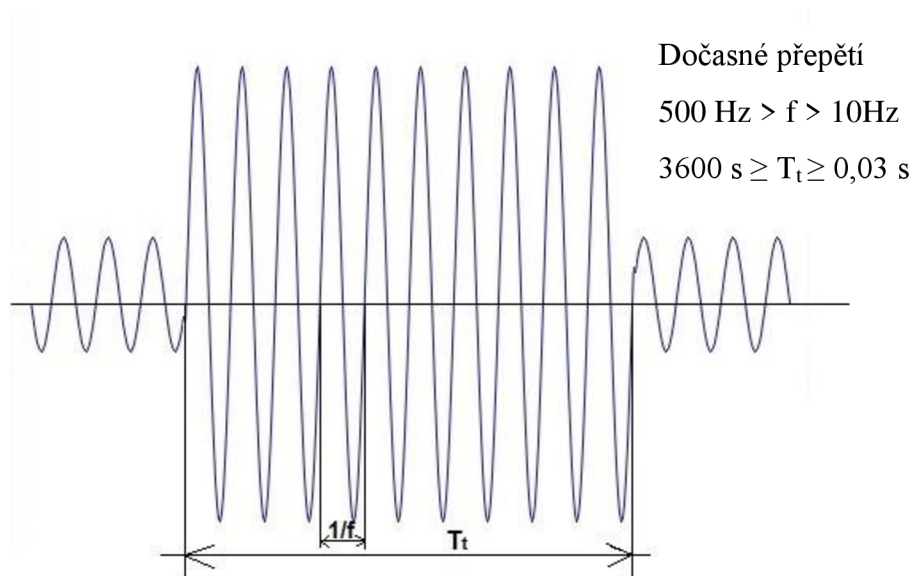
V této kapitole se budeme blíže věnovat pojmu přepětí a také jak můžeme druhy přepětí klasifikovat.

Přepětí v trojfázových střídavých soustavách můžeme definovat podle [1] jako jakékoliv napětí mezi fázemi nebo mezi fázemi a zemí, které svou amplitudou překračuje amplitudu jmenovitého napětí. Přepětí mohou být odlišné svou velikostí, příčinou vzniku, časovým průběhem, frekvencí výskytu. Norma rozděluje přepětí podle časového průběhu a jeho délky trvání do těchto skupin:

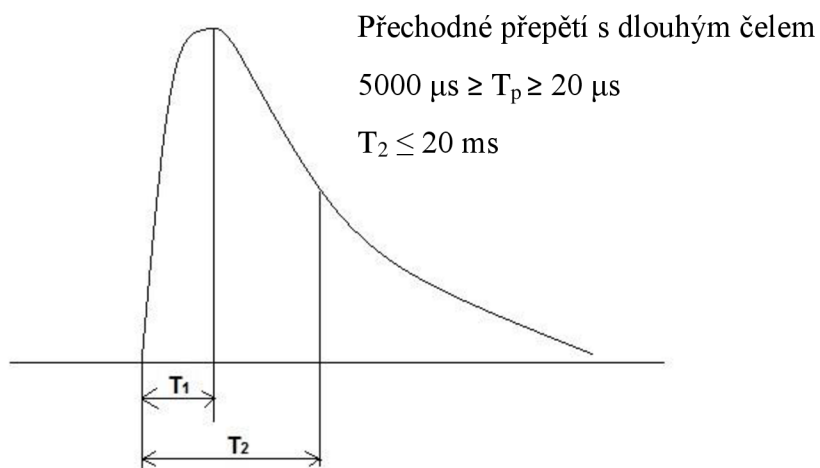
- **trvalé přepětí** – jedná se o napětí síťového kmitočtu a jeho efektivní hodnota je považovaná za konstantní (Obr. 3-1).
- **dočasně přepětí** – je definováno jako střídavé přepětí o síťové frekvenci a době trvání od 0,03 s do 3600 s (Obr. 3-2).
- **přechodné přepětí** – jedná se o přepětí trvající pouze několik milisekund nebo méně, které má krátkodobě oscilační nebo neoscilační průběh obvykle silně tlumený. Dále se přechodová přepětí dělí na:
 - přepětí s dlouhým (pomalým) čelem – jedná se o přechodné přepětí zpravidla impulsní, s dobou do vrcholu $20 \mu\text{s} < T_1 \leq 5000 \mu\text{s}$ a s dobou trvání půltýlu $T_2 \leq 20 \text{ms}$ (Obr. 3-3).
 - přepětí s krátkým (rychlým) čelem – jedná se o přechodné přepětí zpravidla impulsní, s dobou do vrcholu $0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ a s dobou trvání půltýlu $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$ (Obr. 3-4).
 - přepětí s velmi krátkým (velmi rychlým) čelem – jedná se o přechodné přepětí zpravidla impulsní, s dobou do vrcholu $T_1 \leq 0,1 \mu\text{s}$ a s dobou trvání $T_t \leq 3\text{ms}$, na které je superponované napětí s frekvencí od 30 kHz do 100 MHz (Obr. 3-5).
- **kombinované přepětí** – přepětí, které vzniká, jakmile se vyskytnou současně dva druhy přepětí.



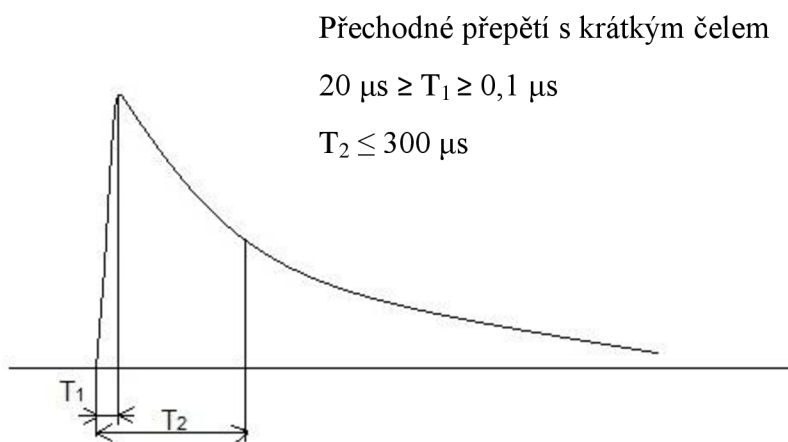
Obr. 3-1 Trvalé přepětí [1]



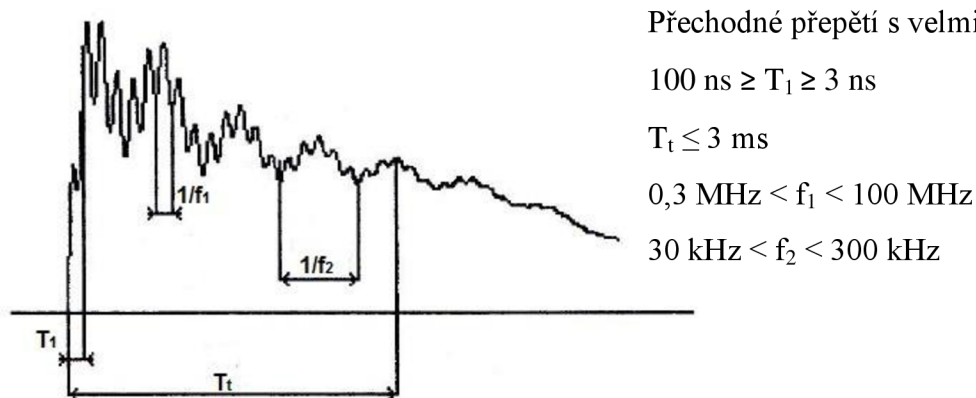
Obr. 3-2 Dočasné přepětí [1]



Obr. 3-3 Přechodné přepětí s dlouhým čelem [1]



Obr. 3-4 Přechodné přepětí s krátkým čelem [1]



Obr. 3-5 Přechodné přepětí s velmi krátkým čelem – upraveno autorem [1]

Důsledkem špatně nastaveného přepínače odboček na transformátoru může dojít ke vzniku *trvalého přepětí*. Přepětí *dočasné* může vzniknout například v soustavě s izolovaným uzlem, když dojde k jednofázovému zemnímu spojení, tato dočasná přepětí o kmitočtu 50Hz mohou být nebezpečná i pro soustavy, jejichž jmenovité napětí je větší než 35kV. Dokud nedojde k poruše, je napětí fázi proti zemi rovno napětí fázovému, jakmile ovšem dojde k poruše (k zemnímu spojení), dostanou se tady fáze bez poruchy („zdravé“ fáze) proti zemi na napětí sdružené. Toto sdružené napětí na zdravých fázích zůstane do té doby, než bude zemní spojení odstraněno, přičemž soustava i během poruchy může dodávat neustále elektrickou energii, ale musíme uvažovat, že u takovéto sítě musí být její izolace dimenzovaná na toto dané sdružené napětí. Přechodná přepětí zde vznikají, když dojde k zapnutí trvalého zemního spojení nebo při jeho vypínání, ale i taky při přerušovaném zemním spojení [1],[2].

Pro *přechodná přepětí* můžeme také použít dělení na přepětí **spínací (vnitřní přepětí)** – zde se jedná o přepětí s dlouhým (pomalým) čelem. A na přepětí **atmosférická (vnější přepětí)** – zde se jedná o přepětí s krátkým (rychlým) čelem a velmi krátkým (velmi rychlým) čelem. Takto použité rozdělení vystihuje příčinu vzniku přechodného přepětí, a proto je toto rozdělení velmi známé a používá se často, proto budeme dále toto rozdělení taky uvažovat [1],[2].

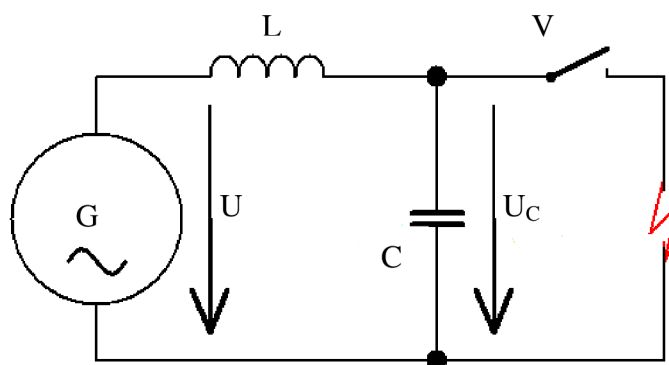
Přechodný děj definujeme jako děj, který plynule spojuje dva různé stavy systému a je pokaždé spojen se změnami energie, která je akumulovaná v jednotlivých částech systému. Z podstaty energie tyto změny proběhnout skokově nemůžou. Čas, po který probíhají, závisí na typu energetických interakcí, které se ho účastní a na jejich počtu. Pokud takto pohlédneme na elektroenergetickou soustavu, jeví se nám jako velmi komplikovaný systém, protože se skládá z velkého množství prvků, u kterých při nastalém přechodném ději dochází k výměnám akumulovaných energií, což plyne samozřejmě z jejího samotného účelu. Pro zkoumání konkrétního přechodného děje v elektroenergetické soustavě je proto velmi důležité znát, v jakém kontextu a z jakých příčin k němu dochází a na základě toho určit popis jeho stavu [2].

3.1 Spínací přepětí

Spínacími operacemi tj. zapínáním a vypínáním (ať už plánovaným nebo havarijním) elektrických vedení, transformátorů a jiných prvků sítě, ale také například při zemních spojeních a zkratech měníme náhle parametry soustavy, tudíž zde dochází k přechodným dějům a tím se vyskytuje možnost vzniku přepětí. V této podkapitole si probereme takové varianty spínacích úkonů, při kterých vzniká obvykle největší přepětí [1],[2].

3.1.1 Přepětí při vypínání zkratů

Zkraty v elektroenergetické soustavě představují poruchový stav, vznik tohoto stavu nelze nikdy předem vyloučit, proto při návrhu prvků elektrických obvodů musíme přihlídnout k možnosti jejich vzniku. Například vypínač musíme volit tak, aby byl schopen vypnout i nejtěžší zkrat, jaký může v dané části soustavy vzniknout. Vypínač můžeme zvolit správně jen, pokud přihlídneme i k charakteru přechodného děje, který byl vyvolán vypínáním zkratu [1].



Obr. 3-6 Náhradní schéma - vypínání zkratu

Jednoduchý elektrický obvod, který nám poslouží jako model, na kterém si popíšeme přechodný děj, vznikající při vypínání zkratových proudů ve střídavých obvodech, můžeme vidět na Obr. 3-6. Indukčnost zdroje a vedení nám zde představuje cívka L, kondenzátor C nám zde zastupuje kapacitu vedení a kontaktů vypínače V. Z důvodu zkratu (zkrat vyznačen červeně) vznikne v obvodu velký střídavý proud, který prakticky omezuje jen indukčnost přívodů a zdroje. Prvky v obvodu, sloužící k detekci zkratu dají povel k rozepnutí vypínače. Toto rozepnutí kontaktů však samo o sobě zkratový proud nepřeruší, protože mezi kontakty vypínače nám vznikne elektrický oblouk, který nám pořád proud obvodu uzavírá. Jestli se nám tedy úspěšně podaří rozepnout obvod a tím vypnout zkratový proud, tedy závisí na tom, jak se nám podaří přerušit elektrický oblouk. Napětí na kontaktech vypínače je dáno při rozepínání kontaktů napětím oblouku. Význam tohoto napětí pro přechodný děj je závislý na tom, jak veliké je jmenovité napětí obvodu. U vysokonapěťových obvodů představuje toto napětí oblouku obvykle jen zanedbatelné procento napětí jmenovitého, ovšem u nízkonapěťových obvodů toto napětí oblouku nemůžeme v porovnání s napětím jmenovitým zanedbat. Pro náš model budeme předpokládat napětí oblouku nulové (zanedbáme ho) a dále budeme uvažovat, že stejnosměrná složka zkratového proudu už odezněla. Hledáme časový průběh tzv. zotaveného napětí, jedná se o časový průběh na kontaktech vypínače, tedy $u_c(t)$ [1],[2]. Průběh toho napětí můžeme vidět na Obr. 3-7. Pro napětí v obvodu platí rovnice:

$$L \frac{di}{dt} + u_c = U \cdot \cos(\omega t), \quad (3.1)$$

kde i je proud obvodu, U amplituda napětí zdroje, ω úhlová frekvence. A známe taky vztah platící pro výpočet proudu:

$$i = C \cdot \frac{du_c}{dt}, \quad (3.2)$$

dosazením do rovnice (3.1) za proud dostaneme tedy:

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{u_c}{LC} = \frac{U}{LC} \cdot \cos(\omega t), \quad (3.3)$$

Řešíme tuto rovnici: - protože charakteristická rovnice, která odpovídá výše uvedené rovnici (3.3), má dvojnásobný čistě imaginární kořen, bude úplné řešení této rovnice součtem partikulárního řešení $u_{cp}(t)$ a obecného řešení $u_{co}(t)$ [1],[2]:

$$u_c(t) = u_{co}(t) + u_{cp}(t), \quad (3.4)$$

kde

$$u_{co}(t) = A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (3.5)$$

$$u_{cp}(t) = U \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot \cos(\omega_0 t + \Phi), \quad (3.6)$$

a Φ, φ jsou konstanty.

Okamžik přerušení oblouku nám určuje počáteční podmínky. Proud vypínačem je nulový, taky napětí mezi kontakty vypínače je nulové (odpor oblouku zanedbáváme)

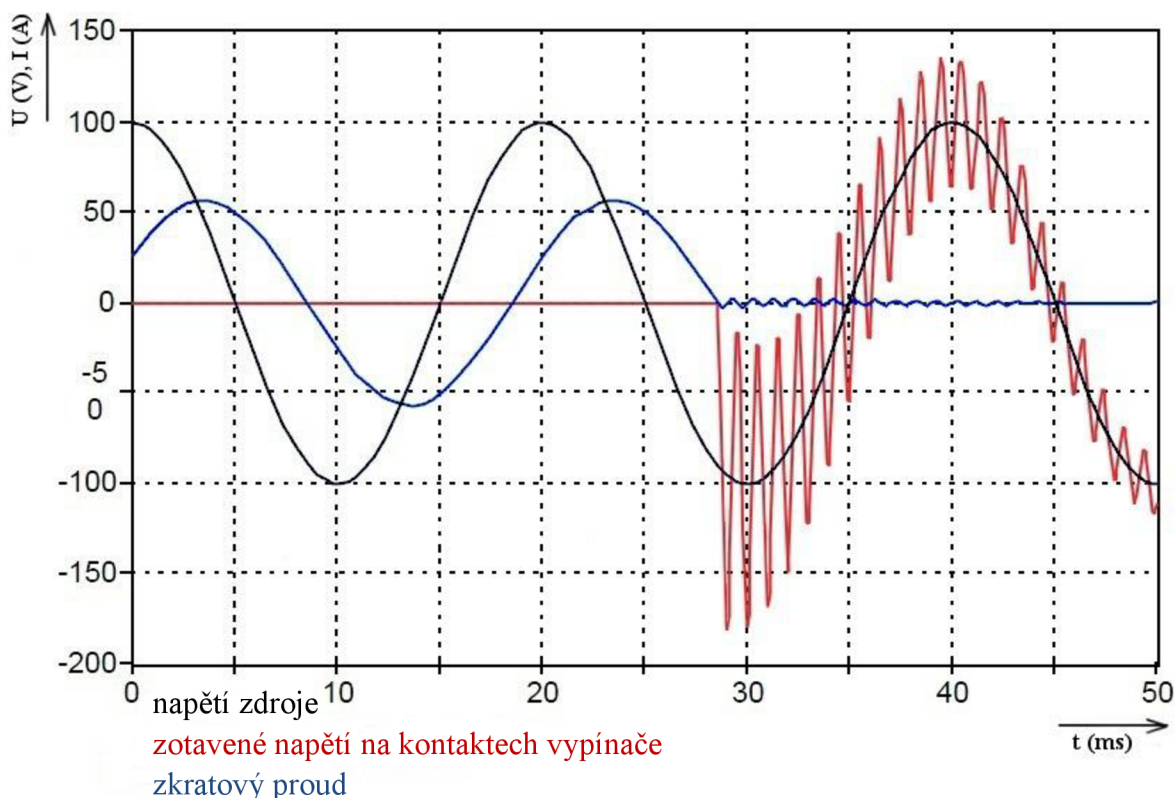
$$i(0) = C \cdot \frac{du_c(t)}{dt} = 0; \quad u_c(t) = 0. \quad (3.7)$$

Pomocí počátečních podmínek, které jsou uvedeny výše, určíme konstanty a dostaneme tak výraz pro zotavené napětí při vypínání zkratového proudu:

$$u_c(t) = U \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cdot [\cos(\omega t) - \cos(\omega_0 t)], \quad (3.8)$$

Předpokládáme, že obvykle platí $\omega_0 \gg \omega$ a proto můžeme výraz (3.8) přepsat následovně a dostaneme konečný výraz pro zotavené napětí $u_c(t)$:

$$u_c(t) = U \cdot [\cos(\omega t) - \cos(\omega_0 t)]. \quad (3.9)$$



Obr. 3-7 Průběh zotaveného napětí při vypínání zkratu – upraveno autorem [2]

3.1.2 Přepětí při vypínání malých induktivních proudů

Malé induktivní proudy jsou označovány jako malé, protože proti již dříve zmiňovaným zkratovým proudům, které jsou násobky jmenovitých hodnot proudů, tyto malé proudy odpovídají jen jejich zlomkům. Tyto malé induktivní proudy se podobně jako zkratové proudy fázově zpožďují proti napětí o $\pi/2$. Ke vzniku tohoto typu přepětí dochází při vypínání transformátorů naprázdno, při vypínání motorů s kotvou nakrátko, které jsou zapojeny naprázdno, dále při vypínání reaktoru nebo kompenzační tlumivky. Jelikož jsou vypínače dimenzovány na vypínání podstatně větších proudů, než je velikost těchto malých indukčních proudů, dochází k nestabilnímu hoření oblouku mezi kontakty vypínače. Tak potom přepětí namáhá vypínací dráhu vypínače a ta se většinou při vypínání prorazí, dochází k tzv. opětným zápalům, které se opakují tak dlouho, dokud vzdálenost kontaktů vypínače není tak velká, že odolá vzrůstu zotaveného napětí. [1],[2].

Jestli nemůžeme zaručit, že se zabrání vzniku přepětí a těmto opakovaným zápalům (rychlý vypínač, zařazením paralelních odporů u vypínače), musíme před tímto vzniklým přepětím ochránit svorky transformátoru (nebo jiných zařízení – např. tlumivka, reaktor) pomocí svodiče přepětí [1],[2].

3.1.3 Přepětí při spínání kapacitních proudů

Za kapacitní jsou označovány střídavé proudy, které předbíhají napětí zdroje o $\pi/2$. U těchto proudů může dojít ke vzniku přepětí nejen při jejich vypínání, ale i při jejich zapínání na rozdíl od proudů induktivních. Pro spínání kapacitního proudu je typickou operací připínání a odpínání kondenzátorové baterie [1].

3.2 Atmosférické přepětí

U zasažených objektů bleskovým výbojem vznikají poškození vyplývající z jeho tepelných, mechanických a elektromagnetických účinků. Vzhledem k zaměření této práce budeme řešit účinky blesku, které stojí za vznikem přepětí v elektroenergetických soustavách. Přepětí, která blesk vyvolává, jsou způsobována jednak úbytkem napětí na vodičích, kterými prochází proud blesku, ale také elektromagnetickým polem, které vzniká v důsledku bleskového výboje [1].

3.2.1 Přepětí při přímém zásahu blesku do vedení

Přepětí, které vznikne přímým zásahem blesku do vodiče vedení je nejnebezpečnější. Proud se po zásahu bleskem začne šířit po vedení na obě strany od místa, ve kterém došlo k zásahu. Když přistoupíme na určité zjednodušení, lze úbytek napětí v místě zásahu určit jako úbytek napětí, který byl vyvolán průchodem proudu blesku přes paralelní kombinaci vlnové impedance vedení Z_v . Pro vlnovou impedanci 300Ω a amplitudu proudu blesku 30 kA můžeme uvažovat vznik napětí podle [1]:

$$U_m = \frac{300}{2} \cdot 30000 = 4,5 \text{ MV} \quad (3.10)$$

Použitím zemních lan se snižuje pravděpodobnost přímého zásahu blesku do vedení. Tato lana na sebe „přitahují“ bleskové výboje, které směřují na vedení. Jestliže dojde k zásahu bleskem do zemního lana nebo přímo do stožáru vedení, tak se v důsledku tohoto zásahu v horní části stožáru, kde se nachází na izolátorech zavěšeny vodiče, objeví napětí proti zemi. V takovémto třífázovém vedení se nachází minimálně jedna fáze vedení, která má okamžitou hodnotu napětí takovou, že napěťové namáhání izolátoru, které zde vznikne, je dáno součtem okamžitého fázového napětí a napětí stožáru proti zemi. Je časté, že působením takového namáhání je překročena elektrická pevnost izolátoru vedení a nastane tzv. zpětný přeskok, který způsobí zapálení elektrického oblouku mezi stožárem a vodičem, neboli dochází ke zkratu vedení. I když se stane, že nevznikne zpětný přeskok a nedojde ke zkratu, může být plynulý provoz elektroenergetické soustavy narušen v důsledku napětí, která jsou do vedení přenesena elektromagnetickou vazbou mezi zemním lanem, stožárem a vedením [1].

3.2.2 Přepětí indukovaná bleskem ve vedení

Bleskové výboje vyvolávají prudké změny v elektromagnetickém poli, díky těmto změnám mohou v elektrických obvodech vznikat indukovaná napětí. Ke vzniku těchto indukovaných napětí dochází často u náchylných venkovních elektrických vedení. Jestliže dojde k úderu blesku nedaleko od vedení (asi do 5 km), může ve vedení dojít ke vzniku nebezpečného napětí jak pro izolaci vlastního vedení, tak i pro připojené zařízení. Způsobit poruchu nebo chybnou funkci elektronických zařízení mohou i indukovaná napětí, která nabývají menších hodnot, což je způsobeno větší vzdáleností vedení od úderu blesku. Kdybychom chtěli porovnat četnost výskytu přepětí, způsobeného přímým zásahem do vedení s četností výskytu přepětí způsobeného indukovanými napětími, došli bychom k závěru, že přepětí způsobené indukovanými napětími se vyskytuje daleko častěji [1].

3.2.3 Budovy a přepětí v nich způsobené bleskem

Ke vzniku přepětí vyvolaného bleskem v budovách dochází v zásadě stejnými mechanismy, jako v případě již zmíněných venkovních vedení. Ovšem v porovnání s venkovními vedeními však budovy se svými elektrickými instalacemi a sdělovacími vedeními představují značně

složitější uspořádání. Jelikož tato práce nepojednává o ochraně budov před úderem blesku a ani o řešení přepětíových ochran elektrických zařízení budov, zmínili jsme se o možnosti vzniku takového přepětí pouze okrajově [1].

3.3 Jiné druhy přepětí

Může dojít ke vzniku přepětí také ještě ve speciálních případech. Jen se krátce zmíníme o dalších možnostech vzniku přepětí.

3.3.1 Elektrostatický výboj

Vzniká na základě vyrovnávání náboje, který vznikl při tření mezi dvěma izolanty a téměř vždy se jedná o lokální záležitost. Je nežádoucí, aby při dotyku osob (v oblečení vyrobených ze syntetických vláken) nabitých statickou elektřinou (na napětí přesahující i desítky kV) s vedením do zařízení nebo přímo při dotyku na kostru docházelo k ovlivnění funkce elektronického zařízení nebo dokonce k jeho poruše či zničení [3],[4].

3.3.2 Nukleární elektromagnetický impulzy

Vznikají v případě nukleárního výbuchu ve velké výšce nad povrchem země. Můžou být zdrojem velkého elektromagnetického rušení, příčinou tohoto rušení jsou elektromagnetické impulzy. Musíme je brát v potaz u provozu sítí a zařízení, na kterém je závislá obrana státu [4].

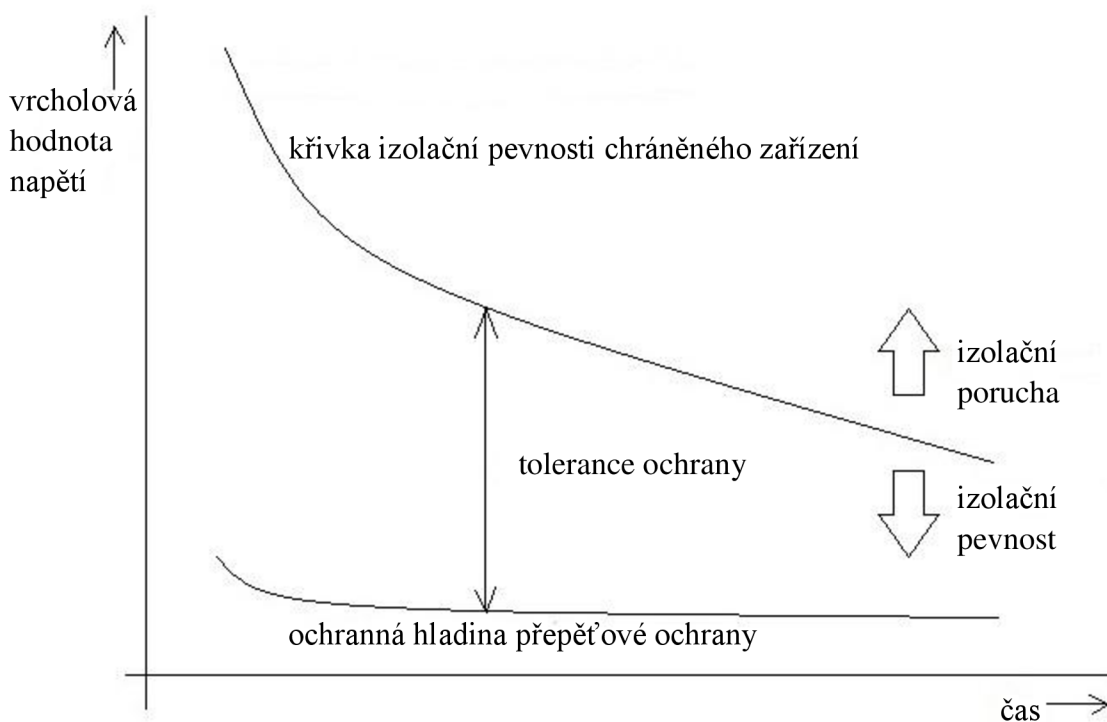
4 PŘEPĚŤOVÉ OCHRANY

Přepětí v elektroenergetických soustavách mohou stát za poruchami izolačních systémů nebo i nesprávnou funkcí připojených zařízení. Což může způsobovat neplánované výpadky dodávky elektrické energie, tyto výpadky spolu s náklady na opravy poškozených zařízení zahrnují nemalé finanční náklady. Proto, když se na věc podíváme z technického, ale i ekonomického hlediska, vidíme zde potřebu zavést nějaké opatření, které tuto možnost vzniku přepětí omezí nebo případně sníží nebezpečnost pro chod elektroenergetické soustavy působením již vzniklého přepětí [1].

Aby byla zajištěna spolehlivá ochrana a správná funkčnost přepět'ové ochrany, musí být volena tak, aby ochranná hladina této přepět'ové ochrany byla v daném odstupu od hranice elektrické pevnosti chráněného zařízení. Na Obr. 4-1 vidíme způsob koordinace chráněného zařízení a ochrany, která je zobrazena pomocí křivek, udávajících průraznou hladinu ochrany a taktéž i chráněného zařízení v závislosti na době trvání přepět'ové vlny a její maximální hodnotě [2].

Všechny přepět'ové ochrany by měly vyhovovat podle [2] následujícím kritériím:

- za normálních provozních podmínek musí být impedance přepět'ové ochrany tak velká, aby v místě jejího připojení nedocházelo k průchodu žádného proudu, nebo aby tento proud byl minimální (řádově mA)
- dojde-li ke zvýšení napětí nad ochrannou hladinu, musí přepět'ová ochrana zareagovat snížením své impedance a tímto umožnit průchodu výbojového proudu do země
- pojmout energii, aniž by došlo ke zničení této ochrany
- po odeznění výboje musí obnovit svou impedanci a tímto tak vrátit chráněnou část sítě do normálních provozních podmínek



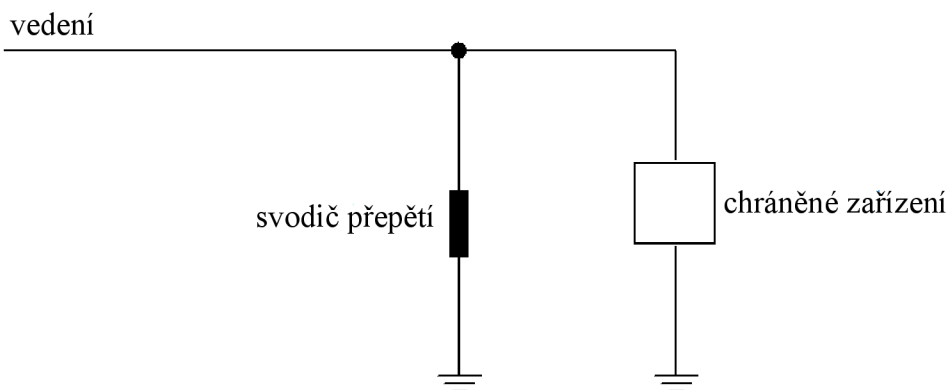
Obr. 4-1 Koordinace ochranné hladiny svodiče a izolační pevnosti chráněného zařízení [2]

4.1 Ochrana vedení proti nepříznivým účinkům blesku

Nejnebezpečnější atmosférická přepětí způsobuje přímý úder blesku do vedení. Jak už bylo uvedeno v rámci této práce dříve, základním opatřením na eliminaci vzniku tohoto typu přepětí je použití zemních lan, která vedou souběžně s fázovými vodiči a jsou uzemněna a umístěna tak, aby byla pravděpodobnost zásahu tohoto lana několikanásobně větší než pravděpodobnost přímého zásahu blesku do fázových vodičů. Umístění zemních lan vychází z teorie ochranného prostoru [1].

4.2 Svodiče přepětí

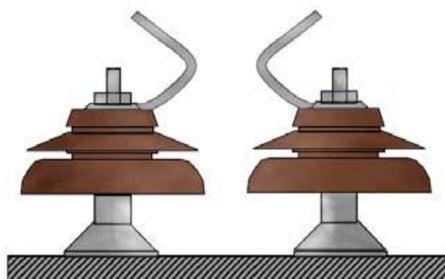
Všechny zařízení pracující v soustavě jako ochrany před přepětím pracují na principu změny impedance v závislosti na napětí, ale vzhledem ke konstrukčním rozdílům se mohou jejich vlastnosti velmi výrazně měnit. Svodiče přepětí jsou zapojeny vždy paralelně ke chráněnému zařízení, jak můžeme vidět na Obr. 4-2 [2].



Obr. 4-2 Schematické zobrazení připojení přepět'ové ochrany

4.2.1 Ochranné (koordinační) jiskřiště

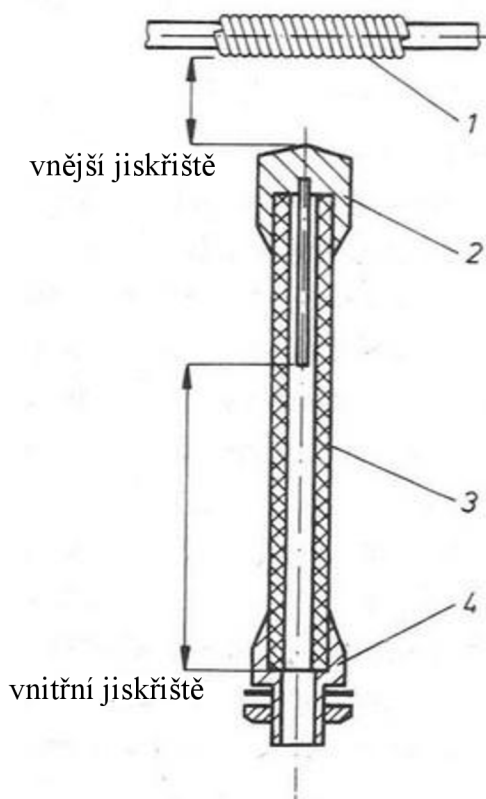
Jedná se o konstrukčně nejjednodušší svodiče přepětí, které mění svou impedanci zapálením elektrického výboje mezi elektrodami jiskřiště, jeho konstrukci můžeme vidět na Obr. 4-3. Při napětích nabývajících nižších hodnot než je napětí zapalovací, je impedance jiskřiště daná jeho svodem a je prakticky zanedbatelná. Jakmile dojde k překročení zapalovacího napětí je impedance tvořena malým odporem elektrického oblouku hořícího mezi elektrodami jiskřiště. Nevýhodou tohoto jiskřiště je, že i po odeznění přepětí má malou impedanci, protože oblouk hořící mezi elektrodami je po jeho zapálení udržován jmenovitým napětím soustavy. Říkáme, že jiskřištěm prochází tzv. následný proud ze soustavy, který reprezentuje pro soustavu zkrat nebo zemní spojení. Aby došlo k uhašení oblouku hořícího mezi elektrodami, je nutné vypnout postiženou část sítě [1],[2].



Obr. 4-3 Ochranné jiskřiště [3]

4.2.2 Vyfukovací bleskojistky

Vyfukovací bleskojistky známé taky jako Torokovy trubice odstraňují částečně nevýhodu ochranného jiskřiště tím, že je oblouk přerušen expanzí plynů, která je vyvolaná hořením oblouku na jiskřišti, jenž je umístěno v trubici a je v sériovém zapojení s jiskřištěm zapalovacím. Tento uvedený způsob zhášení oblouku s sebou přináší velkou závislost mezi velikostí procházejícího proudu bleskojistkou a strmostí zotaveného napětí a dále také dochází ke snižování životnosti bleskojistky, jelikož dochází k degradaci plynatvorné látky. V současné době jsou tato zařízení už dávno překonaná a jako ochrana před přepětím se nepoužívají [2]. Torokovu trubici můžeme vidět na Obr. 4-4.



1. fázový vodič zesílený proti opálení
2. elektroda
3. izolační trubice
4. uzemněná druhá elektroda

Obr. 4-4 Torokova trubice - upraveno autorem [5]

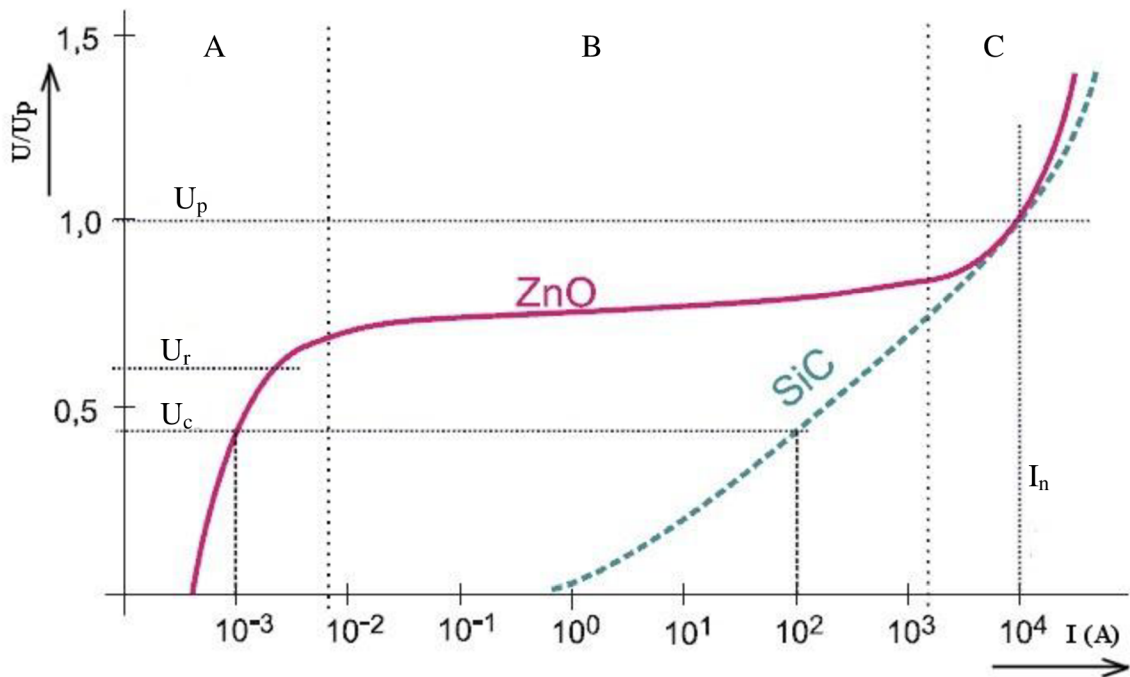
4.2.3 Svodiče přepětí s nelineárními odpory

Nelineární odpory jsou schopné měnit svoji rezistenci v širokém rozsahu napětí na nich přiloženého a dokážou tedy fungovat jako spolehlivá přepět'ová ochrana s odpovídajícími požadavky. Voltampérovou charakteristiku takového svodiče přepětí lze obecně popsat podle [2] vztahem (4.1):

$$I = k \cdot U^\alpha, \quad (4.1)$$

kde mocnitél α je závislý na materiálu a na velikosti přiloženého napětí. Na Obr. 4-5 můžeme vidět porovnání voltampérových charakteristik nelineárních odporů, vyrobených z oxidu zinku (ZnO) a karbidu křemíku (SiC). Z těchto charakteristik můžeme vyčíst, že hodnota mocnitél α nabývá pro materiál ZnO různých hodnot podle toho, jaké je přiložené napětí - tedy v úseku A a

C nabývá mocnidel hodnot $0 < \alpha \geq 5$, v úseku **B** je $\alpha \approx 50$. Pro odporový materiál SiC lze do rovnice dosazovat za α v rozmezí 5 – 7 [2].



Obr. 4-5 V-A charakteristiky napět'ově závislých odporů – upraveno autorem [2]

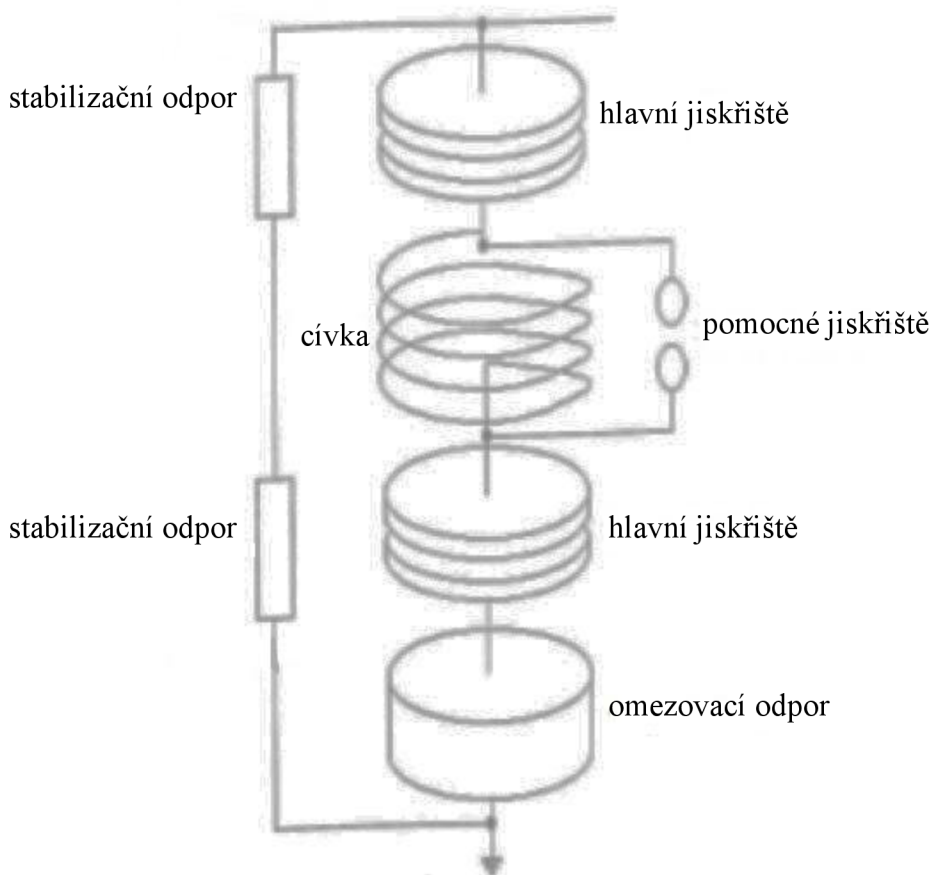
4.2.3.1 Ventilové bleskojistky

Při konstrukci přepět'ových svodičů tohoto typu (ventilových bleskojistik), byl použit karbid křemíku SiC, který má sice potřebné vlastnosti, které uplatní na omezení přepětí, ale při normálním napětí je jeho odpor poměrně dost malý, takže kdyby jím procházel proud, docházelo by jednak k velkým ztrátám energie a také by byl svodič tepelně přetěžován. K odstranění této nevýhody nám posloužilo, že se před napět'ově závislý odpor předradilo jiskřiště, které slouží vlastně jako takový spínač, při normálním napětí tento odpor odděluje od napětí, ale jakmile dojde k přepětí, zapálí se v jiskřišti oblouk a tím pádem je pomocí tohoto oblouku odpor zapojen. Ventilové bleskojistky bývají různého provedení, toto provedení záleží na napět'ových úrovních a na různých velikostech proudů, které mají být bez poškození bleskojistky svedeny [1],[2].

Na Obr. 4-6 můžeme vidět názorný příklad ventilové bleskojistky, která se skládá ze dvou hlavních jiskřišť, magnetické cívky s paralelním pomocným jiskřištěm, napět'ově závislého omezovacího odporu (SiC) v sérii s hlavními jiskřišti a dále ze stabilizačních napět'ově závislých odporů připojených paralelně k jiskřištím. Při přivedení přepětí na svorky ventilové bleskojistky se zapálí na obou hlavních jiskřištích oblouk a začne přes cívku a sériově zapojený odpor protékat proud. Tento nárůst proudu indukuje na cívce napětí a dochází k zapálení pomocného jiskřiště a tím i ke zkratování cívky. Impedance bleskojistky je teď dána pouze úbytkem na napět'ově závislém odporu. Po svedení přepětí dochází k podstatnému snížení impedance cívky a tím i ke zhasnutí oblouku na pomocném jiskřišti – dojde tímto k opětovnému zařazení cívky do obvodu. Cívka začne vytvářet magnetické pole, které začne působit na proud obloukových výbojů na hlavních jiskřištích tím, že oblouk vytlačuje do zhasacích komor, tyto komory jsou součástí jiskřišť. Tímto dojde k přerušení výbojů a k zamezení následného proudu. Paralelně vřazené k hlavním jiskřištím omezují vliv vnějších elektrických polí na jiskřiště a také rovnoměrné rozložení napětí na jiskřištích, tímto dochází ke stabilizaci zapalovacího napětí [1].

Základní charakteristiky ventilových bleskojistek podle [2],[7]:

- *Jmenovité napětí* – maximální dovolená efektivní hodnota střídavého napětí průmyslového kmitočtu mezi svorkami bleskojistky, pro toto napětí je bleskojistka navržena a taky na této hladině správně působí
- *Zapalovací napětí* – při normalizovaném atmosférickém impulzu je nejnižší vrcholová hodnota impulzu napětí 1,2/50, tento impulz vždy vyvolá reakci bleskojistky
- *Zbytkové napětí* při jmenovitém výbojovém proudu – ochrannou hladinu bleskojistky určuje úbytek napětí na bleskojistce, který vyvolá procházející výbojový proud
- *Jmenovitý výbojový proud* – vrcholová hodnota výbojového proudu 8/20, jedná se o proud, který je schopna bleskojistka svést bez poškození
- *Ochranná hladina bleskojistky* – je určena zbytkovým napětím, když působí jmenovitý výbojový proud



Obr. 4-6 Schéma složení ventilové bleskojistky – upraveno autorem [1]

4.2.3.2 Svodiče přepětí se ZnO

Dnes nejpoužívanější a nejspolehlivější svodiče přepětí a rovněž nejrozšířenější svodiče ve vysokonapět'ových distribučních sítích a od svého uvedení na trh roku 1975 postupně téměř zcela nahradily ventilové bleskojistky, jejichž konstrukci můžeme vidět na Obr. 4-8. Napět'ově závislé

odpory ZnO je možno použít jako svodiče přímo, nemusíme u nich vřazovat zapalovací jiskřiště díky jejich charakteristice, kterou vidíme na Obr. 4-5.

Pro označení svodičů přepětí se ZnO se v češtině užívá termínů podle [1]:

- omezovače přepětí
- bezjiskřišť'ovébleskojistky
- bleskojistky ZnO

I když názevbleskojistky ZnO je trochu zavádějící jelikož se u nejmodernějších ventilovýchbleskojistek používá taky napět'ově závislý odporový materiál ZnO. Velikost odporů vyrobených z materiálu ZnO je závislý nejen na napětí, ale taky na teplotě. Na to je třeba myslet při návrhu omezovačů přepětí, jelikož dlouhodobé zvýšení napětí na omezovači způsobí pokles jeho odporu a tím i nárůst proudu, s nímž souvisí zvýšený vývin tepla, které jestli není dostatečně odváděno, způsobí následně další pokles odporu a tím opět dojde k navýšení ztrát. Nastává tedy tepelná nestabilita, která může vést až k havárii omezovače. Omezovač je popsán parametry, na základě kterých se provádí jeho volba, tyto parametry jsou ovšem odlišné od parametrů, které popisují ventilovébleskojistky. Tyto parametry lze rozdělit na parametry, které charakterizují vlastnosti omezovače z hlediska omezování přepětí a taky na parametry, které vyjadřují odolnost omezovače proti přetížení [1].

Zde máme odvození ochranných vlastností omezovačů přepětí podle [1]:

- jsou odvozeny od velikosti zbytkového napětí při zkoušce impulzem proudu s dobou čela 1 μ s a dobou půltýlu 20 μ s,
- od velikosti zbytkového napětí při zkoušce impulzem proudu tvaru 8/20 μ s a
- od velikosti zbytkového napětí při zkoušce spínacím impulzem proudu s dobou čela od 30 do 100 μ s a s dobou půltýlu dvojnásobné velikosti proti době čela.

Základními charakteristikami omezovačů přepětí jsou podle [2],[7]:

- *Trvalé provozní napětí* (U_c) – nejvyšší dovolená hodnota sinusového napětí o průmyslovém kmitočtu, která může být trvale připojena na svorky omezovače přepětí:
 - u sítí s automatickým vypínáním zemní poruchy $U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}$
 - kompenzované nebo izolované sítě $U_c \geq U_m$

Trvalé provozní napětí volíme s ohledem na předpokládanou hodnotu dočasného přepětí U_{TOV} a taky musíme respektovat dobu, po kterou toto dočasné přepětí působí $U_c \geq \frac{U_{TOV}}{T(t)}$.

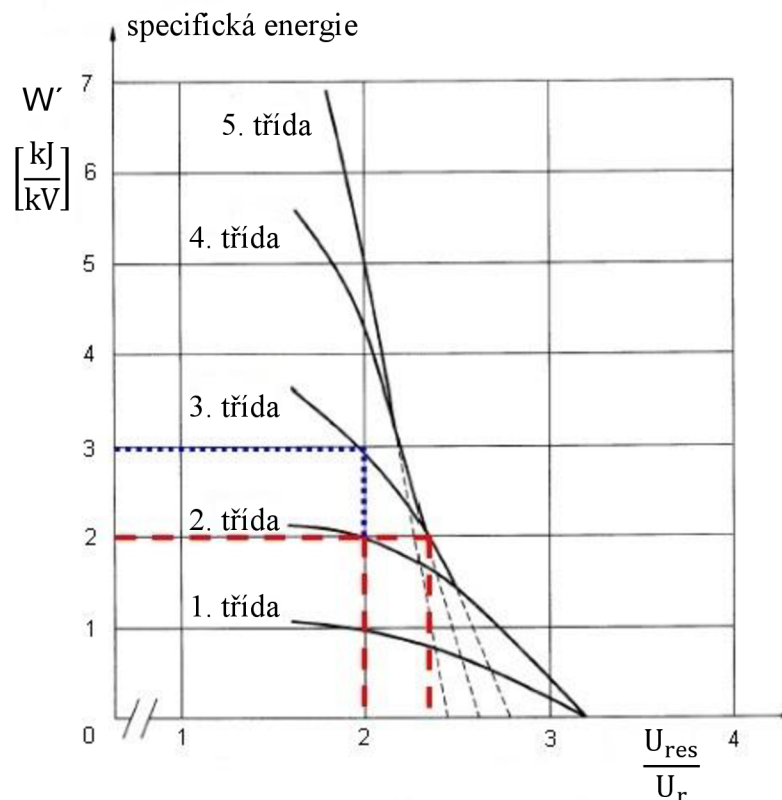
- *Jmenovité napětí* (U_r) – jedná se o nejvyšší střídavé napětí, které je použito při zkoušce provozní funkce po dobu 10 s. Hodnota tohoto napětí po přiložení na svorky omezovače nesmí ovlivnit po dobu 10 s jeho funkčnost.
- *Zbytkové napětí při jmenovitém výbojovém proudu* (U_{res}) – výbojový proud svým průchodem přes omezovač vyvolá úbytek napětí, který určuje ochranou hladinu omezovače. Někde se můžeme setkat s termínem výbojové napětí.
- *Jmenovitý výbojový proud* (I_n) – jedná se o vrcholovou hodnotu atmosférického proudového impulzu, pomocí níž klasifikujeme omezovač přepětí. Jeho hodnota může nabývat hodnot 1,5; 2,5; 5; 10 nebo 20 kA.

- *Ochranná hladina (U_p)* – je určena ze zbytkových napětí, které jsou vytvořeny při atmosférickém a spínacím impulzu.
- *Třída vybití vedení* – je charakteristická schopnost omezovače přepětí pohlcovat energii výbojného proudu, jenž má danou odpovídající amplitudu a tvar. Třídou vybití klasifikujeme právě pomocí velikosti této energie, kterou je omezovač schopen pojmout. Omezovače o nominálním výbojovém proudu 10 kA mají přiřazeny třídy vybití 1, 2, 3 a třída vybití 4 nebo 5 je přiřazena omezovačům s nominálním výbojovým proudem 20 kA. Omezovače s nižšími hodnotami výbojových proudů (5 kA, 2,5 kA) nejsou do tříd vybití klasifikovány. Více můžeme vidět v Tab. 4-1 a na Obr. 4-7.

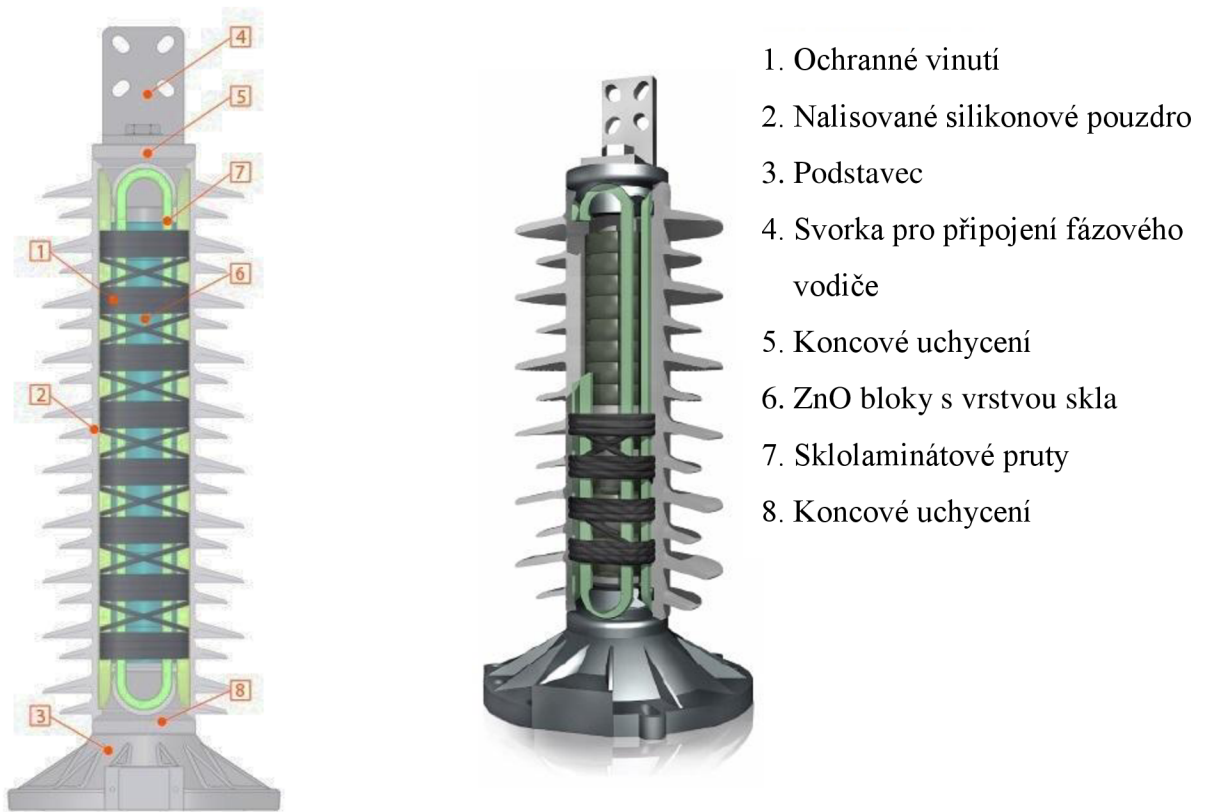
Klasifikace omezovače přepětí	Třída vybití vedení	Rázová impedance vedení Z Ω	Doba trvání vrcholu T μs	Nabíjecí napětí U_L kV DC
10 000 A	1	$4,9 U_r$	2 000	$3,2 U_r$
10 000 A	2	$2,4 U_r$	2 000	$3,2 U_r$
10 000 A	3	$1,3 U_r$	2 400	$2,8 U_r$
20 000 A	4	$0,8 U_r$	2 800	$2,6 U_r$
20 000 A	5	$0,5 U_r$	3 200	$2,4 U_r$

U_r je jmenovité napětí zkoušeného vzorku v kilovoltech (efektivní hodnota).

Tab. 4-1 Parametry pro zkoušku vybitím vedení pro omezovače přepětí 10 kA a 20 kA [6]



Obr. 4-7 Specifická energie v kJ na kV jmenovitého napětí v závislosti na poměru zbytkového napětí při spínacím impulzu U_{res} k efektivní hodnotě jmenovitého napětí U_r omezovače [6]



Obr. 4-8 Omezovač přepětí - upraveno autorem [10]

4.2.4 Svodiče přepětí pro ochranu vnitřních elektrických rozvodů a zařízení

Přepětí v budovách mohou vznikat v rozvodech nízkého napětí a ve sdělovacích vedeních indukovaním od bleskových výbojů, v rozvodech nízkého napětí mohou také vznikat přepětí v důsledku spínání elektrických spotřebičů. Nejčastější formou vzniku přepětí je ovšem jeho zavlečení po vedení, které vstupuje do objektu [1]. Při ochraně proti tomuto přepětí se používají tyto typy svodičů, které dělíme podle [4] následovně:

- **prvky na bázi jiskřiště**
 - vzduchová jiskřiště, která mohou být otevřená nebo uzavřená
 - výbojkové bleskojistky (jistící výbojky), jsou to vlastně uzavřená jiskřiště, která jsou naplněná inertním plynem o nízkém tlaku

- **prvky využívající polovodičů**
 - metaloxidové varistory
 - supresorové diody (rychlé Zenerovy diody)

5 STANDARDY SVODIČŮ PŘEPĚTÍ BEZ JISKŘIŠŤ (OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ)

V této kapitole se budeme zabývat testováním svodičů přepětí, všechny informace zde použité budeme čerpat z norem ČSN EN 60099-4 [6], ČSN EN 60099-5 [7].

5.1 Označování omezovače přepětí

Omezovače přepětí musí být označeny minimálně těmito údaji, které musí být uvedeny na jejich štítku:

- trvalé provozní napětí
- jmenovité napětí
- jmenovitý kmitočet, je-li jiný než jsou normalizované kmitočty
- jmenovitý výbojový proud
- jmenovitý výdržný zkratový proud v kiloampérech (kA). U omezovačů, pro které odolnost při zkratu není uvedena, musí být uvedena značka „-“
- jméno výrobce nebo obchodní značka, typ a označení kompletního omezovače přepětí
- označení montážních pozic jednotlivých dílů (pouze u vícedílných omezovačů)
- rok výroby
- číslo série (jmenovité napětí vyšší než 60 kV)

Pokud je na štítku dostatek prostoru, měl by také obsahovat:

- třídu vybití vedení nebo typ pro silné bleskové zatížení
- hodnotu výdržné hladiny znečištění izolačního pláště

5.2 Klasifikace omezovače přepětí

Klasifikace omezovačů přepětí, kterou vidíme v Tab. 5-1 se provádí podle jejich normalizovaných jmenovitých výbojových proudů, dále musí splnit alespoň zkušební požadavky a provozní charakteristiky uvedené u typových zkoušek.

	Normalizovaný jmenovitý výbojový proud				
	20 000 A	10 000 A	5 000 A	2 500 A	1 500 A
Jmenovité napětí U_r , kV _{efektivní}	$360 < U_r \leq 756$	$3 \leq U_r \leq 360$	$U_r \leq 132$	$U_r \leq 36$	projednává se

Tab. 5-1 Klasifikace omezovačů přepětí

5.3 Normalizované hodnoty napětí

Rozsah jmenovitého napětí efektivní hodnota v KV	Kroky jmenovitého napětí efektivní hodnota v KV
< 3	Projednává se
3 – 30	1
30 – 54	3
54 – 96	6
96 – 288	12
288 – 396	18
396 – 756	24

POZNÁMKA Jiné hodnoty jmenovitého napětí mohou být akceptovány za předpokladu, že jsou násobkem 6.

Tab. 5-2 Kroky jmenovitých napětí

5.4 Normalizované kmitočty

Normalizované jmenovité kmitočty pro omezovače přepětí jsou 50 Hz a 60 Hz.

5.5 Normalizované jmenovité proudy

Jedná se o normalizované jmenovité výbojové proudy tvaru 8/20 a jsou následující: 20 kA, 10 kA, 5 kA, 2,5 kA, 1,5 kA

5.6 Provozní podmínky

5.6.1 Normální provozní podmínky

Aby omezovač přepětí vyhověl normě, musí být vhodný pro provoz při následujících provozních podmínkách, které jsou brány jako normální:

- teplota okolního vzduchu v rozsahu od -40°C do $+40^{\circ}\text{C}$
- sluneční záření (účinky maximálního slunečního záření $1,1 \text{ kW/m}^2$)
- nadmořská výška nepřevyšující 1000 m
- kmitočet střídavého napětí nesmí být nižší než 48 Hz a vyšší než 62 Hz
- střídavé napětí mezi napěťovou a zemní svorkou omezovače přepětí nesmí převýšit jeho trvalé provozní napětí
- mechanické podmínky (projednává se)
- podmínky znečištění (dosud žádné požadavky)
- rychlost větru $\leq 34 \text{ m/s}$
- vertikální montáž

5.6.2 Zvláštní provozní podmínky

Jestliže bude omezovač přepětí používán pro aplikace nebo provozní podmínky odlišné od normálních, může být vyžadována zvláštní pozornost při výrobě (úpravy v konstrukcích, atd..) nebo použití a každý takový případ by měl být konzultován s výrobcem daného omezovače přepětí.

5.7 Požadavky kladené na omezovače přepětí

5.7.1 Výdržné izolační hodnoty pláště omezovače přepětí

Izolační plášť omezovače přepětí musí při zkouškách vydržet následující napětí:

- ochranná hladina omezovače přepětí při atmosférickém impulzu násobená 1,3
- 1,25 násobenou ochrannou hladinou pro omezovače přepětí 10 kA a 20 kA se jmenovitým napětím 200 kV při spínacím impulzu
- jestliže se jedná o omezovač přepětí, který je použit ve venkovní aplikaci, tak potom střídavé napětí síťového kmitočtu za deště a za sucha při vnitřní aplikaci

Izolační plášť omezovačů přepětí 1,5 kA, 2,5 kA a 5 kA a omezovačů pro silné atmosférické zatížení musí vydržet střídavé napětí síťového kmitočtu s vrcholovou hodnotou, která je rovna ochranné hladině při atmosférickém impulzu násobenou 0,88 po dobu trvání 1 minuty. Pláště omezovačů 10 kA a 20 kA, které mají jmenovité napětí nižší než 200 kV, po dobu 1 minuty musí vydržet střídavé napětí, jehož vrcholová hodnota je rovna ochranné hladině při spínacím impulzu násobené 1,06.

5.7.2 Referenční napětí

Každý omezovač přepětí musí mít výrobcem měřené referenční napětí při referenčním proudu zvoleném výrobcem. Minimální referenční napětí omezovače přepětí při referenčním proudu použitým při výrobní kusové zkoušce musí být stanoveno a vyznačeno ve výrobních údajích.

5.7.3 Zbytková napětí

V tomto měření jde o získání maximálních zbytkových napětí pro danou konstrukci pro všechny předepsané proudy a tvary vln. Tyto jsou odvozeny z údajů typové zkoušky a z maximálního zbytkového napětí při atmosférickém proudovém impulzu použitým při výrobních kusových zkouškách, předepsaných a zveřejněných výrobcem.

Maximální zbytkové napětí omezovače přepětí dané konstrukce, pro jakýkoli proud a tvar vlny se vypočítá z hodnoty zbytkového napětí sekcí zkoušených při typových zkouškách násobeného stanoveným poměrovým koeficientem. Tento poměrový koeficient je roven poměru dohodnutého maximálního zbytkového napětí, které se kontroluje během výrobní kusové zkoušky a měřeného zbytkového napětí sekce při stejném proudu a tvaru vlny.

5.7.4 Vnitřní částečné výboje

V omezovači musí být vnitřní částečné výboje ≤ 10 pC, při napětí rovném 1,05násobku trvalého provozního napětí.

5.7.5 Míra netěsnosti

Míra netěsnosti musí být stanovena pro omezovače, které mají uzavřený objem plynu a oddělený těsnicí systém.

5.7.6 Rozdělení proudu u vícesloupcového omezovače přepětí

Nejvyšší hodnota proudu ve sloupci vícesloupcového omezovače přepětí musí být určena výrobcem.

5.7.7 Tepelná stabilita

Pokud dojde k dohodě mezi výrobcem a dodavatelem, může se provést speciální zkouška tepelné stability, viz. kapitola 6.3.2.

5.7.8 Odolnost při dlouhém impulzu proudu

Omezovače přepětí musí vydržet dlouhé proudové impulzy, které se kontrolují při typových zkouškách:

- omezovače přepětí 20 kA a 10 kA - odolnost proti dlouhému impulzu proudu je prokázána zkouškou vybitím vedení, uživatel určí třídu vybití vedení
- omezovače přepětí 5 kA 2,5 kA - odolnost proti dlouhému impulzu proudu je prokázána zkouškou dlouhým impulzem proudu

Po dokončení zkoušek nesmí vizuální prohlídka objevit žádné stopy průrazu, přeskočení, trhlinky ani jiné výrazné známky poškození rezistorů ZnO. Zbytkové napětí měřené před a po zkoušce se nesmí změnit o více než 5%.

5.7.9 Provozní funkce

Omezovač přepětí musí obstát při aplikaci kombinací zatížení, která vznikají v provozu, což lze prokázat zkouškou provozní funkce. Tato namáhání nesmí způsobit poškození nebo tepelné porušení.

5.7.10 Závislost střídavého napětí přiloženého na omezovač přepětí na čase

Zde musí výrobce dodat údaj o přípustné době trvání přiložení střídavého napětí a tomu odpovídající hodnotě napětí o síťovém kmitočtu, která po předeřtání omezovače přepětí na 60°C může být na něj přiložena. A následuje vystavení velkému proudu nebo energetickému zatížení třídy vybití vedení, kterou omezovač přepětí vydrží bez nějakého poškození nebo tepelného porušení.

5.7.11 Zkrat

Jestliže je výrobcem deklarovaná zkratová odolnost, musí se omezovač přepětí podrobit zkratové zkoušce, která má dokázat, že se omezovač přepětí prudce neroztříští.

5.7.12 Odpojovač

5.7.12.1 Odolnost odpojovače

Jestliže je omezovač přepětí vybaven odpojovačem nebo je s odpojovačem spojen musí tento odpojovač vydržet bez zapůsobení tyto zkoušky:

- zkouška dlouhým impulzem proudu
- zkouška provozní funkce

5.7.12.2 Činnost odpojovače

Pro tři hodnoty proudů odpojovače se určuje časově zpožděná činnost, musí být jasný důkaz o fungujícím a neustálém odpojení.

5.7.13 Požadavky na pomocná zařízení jako jsou řídicí součásti

Dosud nebyly v normě zapsány žádné požadavky.

5.7.14 Mechanická zatížení

Výrobce musí být stanoveno maximální přípustné koncové zatížení s ohledem na instalaci a provoz, jako jsou zatížení, které vznikají při ohybu, krutu a v tahu.

5.7.14.1 Ohybový moment

Výrobce deklaruje, jaké hodnoty ohybového zatížení musí omezovač přepětí vydržet.

5.7.14.2 Odolnost proti namáhání prostředím

Omezovač přepětí musí být schopen vydržet namáhání prostředím stanovená pravidly pro tyto zkoušky.

5.7.14.3 Izolační základna

Je-li omezovač přepětí vybaven izolační základnou, musí být toto zařízení schopno vydržet následující zkoušky bez porušení, které by mohlo ovlivnit její funkci:

- zkouška ohybovým momentem
- klimatická zkouška

5.7.15 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetické rušení nemá na omezovače přepětí zásadní vliv, proto nejsou nutné žádné zkoušky jeho odolnosti vůči tomuto rušení.

Při normálních provozních podmínkách nemůže omezovač vyzařovat významné rušení. U omezovačů se jmenovitým napětím 77 kV a vyšším musí být použita zkouška radiového rušení (RIV). Maximální hladina tohoto rušení nesmí při 1,05násobku trvalého provozního napětí překročit 2500 μ V.

5.7.16 Konec životnosti

Když si uživatel zažádá, musí od každého výrobce obdržet dostatečné informace o tom, jak je možno nakládat (sešrotovat jednotlivé části, popřípadě recyklovat) se všemi součástmi omezovače přepětí v souladu s mezinárodními a národními předpisy.

6 TESTOVÁNÍ SVODIČŮ PŘEPĚTÍ BEZ JISKŘIŠŤ (OMEZOVAČŮ PŘEPĚTÍ)

V této kapitole se budeme zabývat testováním svodičů přepětí, všechny informace zde použité budeme čerpat z norem ČSN EN 60099-4 [6]. Podle této normy jsou svodiče přepětí testovány pomocí 4 druhů zkoušek:

- Zkoušky typové
- Zkoušky kusové
- Zkoušky přejímací
- Zkoušky speciální

6.1 Zkoušky typové

Typové zkoušky zpravidla přicházejí po ukončení vývoje omezovače přepětí. Tyto zkoušky mají za úkol zaručit, že svodič přepětí bude pracovat správně a bezpečně. Zkoušky se musí aplikovat i na svodič přepětí, který již prošel zkouškou, ale projde konstrukčními úpravami a tím by mohlo dojít ke změně jeho vlastností.

Mezi typové zkoušky patří:

6.1.1 Výdržné zkoušky pláště omezovače přepětí

Tyto zkoušky musí prokázat, že vnější izolace pláště omezovače je schopna vydržet napěťové namáhání. Zkoušky se provádí podle požadavků určených v podkapitole 5.7.1.

6.1.2 Zkoušky zbytkového napětí

Cílem těchto zkoušek je získání potřebných údajů k odvození maximálního zbytkového napětí. Maximální zbytkové napětí při proudovém atmosférickém impulzu, musí být zjištěno a výrobcem publikováno.

6.1.2.1 Zkouška zbytkového napětí strmým impulzem proudu

Na každý ze tří zkoušených vzorků je přiložen jeden strmý proudový impulz s dobou čela 1 μs s tolerancí nastavení zařízení tak, aby měřené hodnoty byly v rozmezí od 0,9 μs do 1,1 μs , doba půltýlu nebude delší než 20 μs . Vrcholová hodnota tohoto impulzu je rovna jmenovitému výbojovému proudu omezovače $\pm 5\%$.

6.1.2.2 Zkouška zbytkového napětí při atmosférickém impulzu

Na každý ze tří zkoušených vzorků se přiloží po jednom atmosférickém proudovém impulzu 8/20 s tolerancí nastavení zdroje tak, aby měřené hodnoty byly v rozmezí pro dobu čela od 7 μs do 9 μs , doba půltýlu od 18 μs do 22 μs . Určená zbytková napětí se vynesou do grafu v závislosti na jmenovitém výbojovém proudu. Zbytkové napětí odečtené z tohoto grafu, které odpovídá jmenovitému výbojovému proudu je definováno jako ochranná hladina omezovače přepětí.

6.1.2.3 Zkouška zbytkového napětí při spínacím impulzu

Na každý ze tří zkoušených vzorků se pro každou předepsanou vrcholovou hodnotu v Tab. 6-1 přiloží spínací impulz proudu, který má dobu čela delší než 30 μs , ale kratší než 100 μs a

dobu pultýlu rovnou zhruba dvojnásobku doby čela a vrcholové hodnoty podle Tab. 6-1 s tolerancí $\pm 5\%$.

Klasifikace omezovačů přepětí	Vrcholová hodnota proudu A
20 000 A, třída vybití vedení 4 a 5	500 a 2 000
10 000 A, třída vybití vedení 3	250 a 1 000
10 000 A, třída vybití vedení 1 a 2	125 a 500

Tab. 6-1 Vrcholové hodnoty proudů pro měření zbytkového napětí při spínacím impulzu

6.1.3 Výdržná zkouška dlouhým impulzem proudu

Tato zkouška požaduje, aby pro účely vyhodnocení bylo před touto zkouškou provedeno měření zbytkových napětí při atmosférickém impulzu pro jmenovitý výbojový proud omezovače. Každá zkouška musí obsahovat 18 výbojů, které jsou rozděleny do šesti skupin po třech výbojích. Interval mezi výboji musí být 50 s až 60 s a interval mezi skupinami výbojů musí být takový, aby zkoušený vzorek vychladl asi na teplotu okolí. Po provedené této zkoušky se znovu musí změřit zbytková napětí a porovnat hodnoty naměřené před a po téhle zkoušce. Hodnoty se nesmí lišit o více jak 5%.

6.1.4 Zkouška provozní funkce

Při této zkoušce se simulují provozní podmínky tím, že se na omezovač přepětí přiloží určitý počet předepsaných impulzů v kombinaci s rovněž předepsaným střídavým napětím s určeným kmitočtem. Napětí musí být měřeno s přesností $\pm 1\%$ a jeho vrcholová hodnota se nesmí změnit o více než 1% v rozsahu od stavu naprázdno do stavu plného zatížení. Poměr mezi efektivní a vrcholovou hodnotou je $\sqrt{2}$ a od této hodnoty se nesmí tento poměr lišit o více než 2%. Hlavní požadavek splnění této zkoušky je, aby se omezovač stihl ochladit při přiložení střídavého napětí, tzn. aby nedošlo k tepelné nestabilitě.

6.1.5 Zkratová zkouška

Tato zkouška je zaměřena na odolnost omezovače přepětí proti zkratu, tj. aby hlavně nedošlo k explozi. V provozu není v žádném případě žádoucí, aby k explozi došlo za jakýchkoliv podmínek.

6.1.6 Zkouška odpojovače/indikátoru poruchy (je-li součástí)

Tato zkouška se provádí na omezovačích, které jsou vybaveny odpojovačem nebo indikátorem poruchy. Nebo jen na sestavě odpojovač/indikátor poruchy, ale jen za předpokladu, že je konstruována tak, že v normální provozní poloze není ovlivněna ohřevem přilehlých částí omezovače.

6.1.7 Měření částečných výbojů

Zkouška se provádí na nejdelší elektrické jednotce omezovače. Napětí o síťovém kmitočtu zvýšíme na jmenovité napětí vzorku, které udržujeme 2 s až 10 s a pak snížíme na hodnotu 1,05násobku trvalého provozního napětí vzorku. Hladina částečných výbojů se měří právě při tomto napětí. Tato hladina nemůže překročit hodnotu 10 pC.

6.1.8 Ohybový moment

Zkouška musí dokázat, že omezovač vydrží hodnoty zatížení na ohyb uváděné výrobcem. Omezovač není za normálních podmínek konstruován pro zatížení v krutu, jestli je potřeba podrobit omezovač zatížením v krutu, je potřeba udělat zvláštní zkoušku podle dohody mezi výrobcem a spotřebitelem. Zatížení se přiloží na volný konec omezovače, a směr tohoto zatížení musí procházet svíslou osou omezovače a musí být na ni kolmý ve směru nejmenší mechanické pevnosti. Informace o nejmenší mechanické pevnosti musí předat výrobce.

6.1.9 Zkoušky vlivu prostředí

Tato zkouška je prováděna metodou urychleného stárnutí a dokazuje, že mechanismus těsnění a namáhání kovů v omezovači nejsou podmínkami prostředí zhoršeny. Za stejný typ omezovače přepětí se považují omezovače, které jsou založeny na stejné konstrukci a materiálu a liší se jen svými rozměry.

6.1.10 Míra netěsnosti

Tato zkouška dokazuje těsnost na plyn/vodu celého systému. Zkouška se provádí na jednom kompletním omezovači, s tím že vnitřní části mohou být vyjmuty. Zkušební vzorek musí být nový a čistý. Výrobce pro stanovení míry netěsnosti použije jakoukoliv citlivou metodu. Maximální míra netěsnosti musí být menší než : $1 \mu W = 1 \times 10^{-6} Pa * m^3 * s^{-1}$

6.1.11 Rádiové rušení (RIV)

Zkouška se provádí na venkovních omezovačích přepětí se jmenovitým napětím 77 kV a vyšším. Provádí se na nejdelším omezovači s největším jmenovitým napětím použitým pro určitý typ omezovače přepětí. Zkoušený vzorek musí být kompletně smontován včetně všech zařízení, které výrobce nabízí jako standardní (přívodní a uzemňovací svorky, stínící kruhy, apod.).

6.2 Zkoušky kusové

Minimální požadavky na výrobní kusové zkoušky, které musí být prováděny výrobcem, jsou:

- měření referenčního napětí, naměřené hodnoty musí být v rozsahu určeném výrobcem.
- měření zbytkového napětí, je povinné pro omezovače se jmenovitým napětím, které přesahuje 1kV. Měření je prováděno buď na kompletním omezovači přepětí, na sestavených dílech omezovače nebo na vzorku skládajícího se ze samostatného nebo i z několika rezistorových bloků. Musí být použit vhodný atmosférický impulz v rozsahu mezi 0,01 a 2násobkem jmenovitého výbojového proudu omezovače, při tomto použitém proudu je zbytkové napětí měřeno. Jestliže zbytkové napětí nemůže být měřeno přímo na kompletním omezovači, změříme zbytkové napětí na jednotlivých rezistorových blocích a jednotlivých dílech omezovače. A výsledné zbytkové napětí omezovače získáme součtem těchto jednotlivých zbytkových napětí. Zbytkové napětí kompletního omezovače nemůže přesáhnout hodnotu stanovenou výrobcem.
- zkouška vnitřních částečných výbojů, prováděna na každé části omezovače. Můžeme zkoušený vzorek odstínit od vnějších částečných výbojů. Napětí o síťovém kmitočtu zvýšíme na jmenovité napětí vzorku, které udržujeme 2 s až 10 s a pak snížíme na hodnotu 1,05násobku trvalého provozního napětí vzorku. Hladina částečných výbojů

se měří právě při tomto napětí. Tato hladina nemůže překročit hodnotu 10 pC. Jako alternativu může výrobce také provést měření vnitřních částečných výbojů při jmenovitém napětí nebo při vyšší hodnotě, bez snížení zkušebního napětí.

- testování těsností u dílů omezovače s utěsněným izolačním pláštěm, musí být aplikována citlivá metoda přijatá výrobcem.
- rozložení proudů u vícesloupcových omezovačů přepětí. Tato zkouška je prováděna na všech skupinách paralelních rezistorů. Je použit výrobcem určený vhodný impulzní proud, který je v rozsahu 0,01 až 1 násobek jmenovitého výbojového proudu, při tomto stanoveném proudu se měří proud procházející každým sloupem. Naměřená hodnota proudu nemůže být vyšší než horní limit udaný výrobcem. Efektivní doba čela proudového impulzu nemůže být kratší než 7 μ s, doba půltýlu může být libovolná.

6.3 Zkoušky přejímací

6.3.1 Normalizované zkoušky

Jestliže odběratel předepíše přejímací zkoušky v dodavatelské smlouvě, musí tyto zkoušky proběhnout na počtu rovném nejbližšímu celému číslu k třetí odmocnině z dodaných omezovačů přepětí následující zkoušky.

- měření střídavého napětí na kompletním omezovači přepětí při referenčním proudu měřeném na spodním konci omezovače přepětí. Tato naměřená hodnota musí být v rozsahu, který stanoví výrobce. U omezovačů sestavených z více dílů se hodnota může lišit od referenčního napětí omezovače přepětí.
- zbytkové napětí při atmosférickém impulzu kompletního omezovače přepětí nebo části omezovače přepětí, jestli je možné tak při použití jmenovitého výbojového proudu nebo při hodnotách proudu vybraných podle typových zkoušek zbytkových napětí, tudíž 0,01 až 2 násobku jmenovitého proudu. Doba půltýlu není v tomto případě důležitá, proto nemusí být splněna. Jestliže měření probíhá na jednotlivých dílech omezovače, výsledné zbytkové napětí omezovače získáme součtem jednotlivých zbytkových napětí. Zbytkové napětí kompletního omezovače nemůže přesáhnout hodnotu stanovenou výrobcem.
- měření vnitřních částečných výbojů prováděné buď na kompletním omezovači, nebo na jednotkách omezovačů. Můžeme zkoušený vzorek odstínit od vnějších částečných výbojů. Napětí o síťovém kmitočtu zvýšíme na jmenovité napětí vzorku, které udržujeme 2 s až 10 s a pak snížíme na hodnotu 1,05 násobku trvalého provozního napětí vzorku. Hladina částečných výbojů se měří právě při tomto napětí. Tato hladina nemůže překročit hodnotu 10 pC.

6.3.2 Zvláštní zkouška tepelné stability

Zkouška, která vyžaduje dodatečný souhlas mezi výrobcem a odběratelem, ještě než bude omezovač namontován. Zkouška se provádí na třech zcela různých sekcích, které obsahují rezistory z oxidů kovů, tyto vzorky jsou odebrány z běžné výroby a musí být stejné jak rozměrově, tak charakteristicky jako ty, které jsou použity ve zkoušených omezovačích. Přiloží se střídavé napětí a je monitorovaná teplota rezistorů nebo činná složka proudu nebo ztrátový výkon. Jestli vyhoví všechny tři vzorky, požadavky zkoušky jsou splněny, ale jinak musí dojít k dohodě mezi výrobcem a odběratelem jak se bude postupovat dál (další zkoušky, atd...).

6.4 Zkoušky speciální

Tyto zkoušky omezovače přepětí jsou prováděny jako součást vývoje svodiče přepětí ve spolupráci s výzkumným ústavem (laboratoří) a zákazníkem. Popisují chování omezovačů přepětí při speciálních podmínkách provozu.

Mezi speciální testy patří testování teploty. Tento test zaručuje výdrž omezovače přepětí až do -60°C , včetně extrémně velkých výkyvů teplot až o 40°C . Zajištěna musí být stálá konstrukce elektrické a mechanické vlastnosti. Povrch by měl být odolný proti poškození opakovaným zatěžováním mrazem. Další testy jsou například test vlhkosti nebo test chování v ohni.

7 NÁVRH LABORATORNÍ ÚLOHY NA TESTOVÁNÍ SVODIČŮ PŘEPĚTÍ

Protože se v této úloze pracuje s VVN (velmi vysokým napětí) a velmi drahým zařízením, je z těchto důvodů tato úloha zpracována jako ukázková, měření bude provádět vyučující, studenti pouze zpracují z naměřených hodnot protokol. Dotovaný čas na tuto laboratorní úlohu je 45 min, za účasti maximálně 5 studentů z kapacitních a bezpečnostních důvodů.

7.1 Cíl úlohy

Cílem této laboratorní úlohy je seznámit se s problematikou testování svodičů přepětí, budeme měřit zbytková napětí na svodiči přepětí při průchodu proudového impulzu 8/20. Naměřené hodnoty porovnejte s údaji, které uvádí výrobce v katalogu. Dále z těchto naměřených hodnot vynesete závislost zbytkového napětí na výbojovém proudu $U_{res}=f(I)$, tato závislost je podle normy jedním z faktorů určujících ochranné charakteristiky omezovače přepětí.

7.2 Teoretický rozbor

Norma rozděluje přepětí podle časového průběhu a jeho délky trvání do těchto skupin:

- **trvalé přepětí** – jedná se o napětí síťového kmitočtu a jeho efektivní hodnota je považovaná za konstantní.
- **dočasně přepětí** – je definováno jako střídavé přepětí o síťové frekvenci a doby trvání od 0,03 s do 3600 s.
- **přechodné přepětí** – jedná se o přepětí trvajícím pouze několik milisekund nebo méně, které má krátkodobě oscilační nebo neoscilační průběh obvykle silně tlumený. Dále se přechodová přepětí dělí na:
 - **přepětí s dlouhým (pomalým) čelem** – jedná se o přechodné přepětí zpravidla impulsní, s dobou do vrcholu $20 \mu s < T_1 \leq 5000 \mu s$ a s dobou trvání půltýlu $T_2 \leq 20 \text{ ms}$.
 - **přepětí s krátkým (rychlým) čelem** – jedná se o přechodné přepětí zpravidla impulsní, s dobou do vrcholu $0,1 \mu s < T_1 \leq 20 \mu s$ a s dobou trvání půltýlu $T_2 \leq 300 \mu s$.
 - **přepětí s velmi krátkým (velmi rychlým) čelem** – jedná se o přechodné přepětí zpravidla impulsní, s dobou do vrcholu $T_1 \leq 0,1 \mu s$ a s dobou trvání $T_1 \leq 3 \text{ ms}$, na které je superponované napětí s frekvencí od 30 kHz do 100 MHz.
- **kombinované přepětí** – přepětí, které vzniká, jakmile se vyskytnou současně dva druhy přepětí.

Svodiče přepětí se ZnO

Dnes nejpoužívanější a nejspolehlivější svodiče přepětí a rovněž nejrozšířenější svodiče ve vysokonapěťových distribučních sítích a od svého uvedení na trh roku 1975 postupně téměř zcela nahradily ventilové bleskojistky. Napěťově závislé odpory ZnO je možno použít jako svodiče přímo, nemusíme u nich vřazovat zapalovací jiskřiště díky jejich charakteristice.

Základními charakteristikami omezovačů přepětí jsou:

- *Trvalé provozní napětí* (U_c) – nejvyšší dovolená hodnota sinusového napětí o průmyslovém kmitočtu, která může být trvale připojena na svorky omezovače přepětí:
 - u sítí s automatickým vypínáním zemní poruchy $U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}$
 - kompenzované nebo izolované sítě $U_c \geq U_m$

Trvalé provozní napětí volíme s ohledem na předpokládanou hodnotu dočasného přepětí U_{TOV} a taky musíme respektovat dobu, po kterou toto dočasné přepětí působí $U_c \geq \frac{U_{TOV}}{T(t)}$.

- *Jmenovité napětí* (U_r) – jedná se o nejvyšší střídavé napětí, které je použito při zkoušce provozní funkce po dobu 10 s. Hodnota tohoto napětí po přiložení na svorky omezovače nesmí ovlivnit po dobu 10 s jeho funkčnost.
- *Zbytkové napětí při jmenovitém výbojovém proudu* (U_{res}) – výbojový proud svým průchodem přes omezovač vyvolá úbytek napětí, který určuje ochranou hladinu omezovače. Někde se můžeme setkat s termínem výbojové napětí.
- *Jmenovitý výbojový proud* (I_n) – jedná se o vrcholovou hodnotu atmosférického proudového impulzu, pomocí níž klasifikujeme omezovač přepětí. Jeho hodnota může nabývat hodnot 1,5; 2,5; 5; 10 nebo 20 kA.
- *Ochranná hladina* (U_p) – je určena ze zbytkových napětí, které jsou vytvořeny při atmosférickém a spínacím impulzu
- *Třída vybití vedení* – je charakteristická schopnost omezovače přepětí pohlcovat energii výbojného proudu, jenž má danou odpovídající amplitudu a tvar. Třidu vybití klasifikujeme právě pomocí velikosti této energie, kterou je omezovač schopen pojmout. Omezovače o nominálním výbojovém proudu 10 kA mají přiřazeny třídy vybití 1, 2, 3 a třída vybití 4 nebo 5 je přiřazena omezovačům s nominálním výbojovým proudem 20 kA. Omezovače s nižšími hodnotami výbojových proudů (5 kA, 2,5 kA) nejsou do tříd vybití klasifikovány.

Zkouška zbytkového napětí

Měření zbytkového napětí, je povinné pro omezovače se jmenovitým napětím, které přesahuje 1kV. Měření je prováděno buď na kompletním omezovači přepětí, na sestavených dílech omezovače nebo na vzorku skládajícího se ze samostatného nebo i z několika rezistorových bloků. Musí být použit vhodný atmosférický impulz v rozsahu mezi 0,01 a 2násobkem jmenovitého výbojového proudu omezovače, při tomto použitém proudu je zbytkové napětí měřeno. Zbytkové napětí kompletního omezovače nemůže přesáhnout hodnotu stanovenou výrobcem.

Ochranné charakteristiky omezovače přepětí

- zbytkové napětí strmý impulz proudu
- závislost zbytkového napětí na výbojovém proudu pro atmosférické impulzy 8/20 μ s
- zbytkové napětí pro spínací impulz

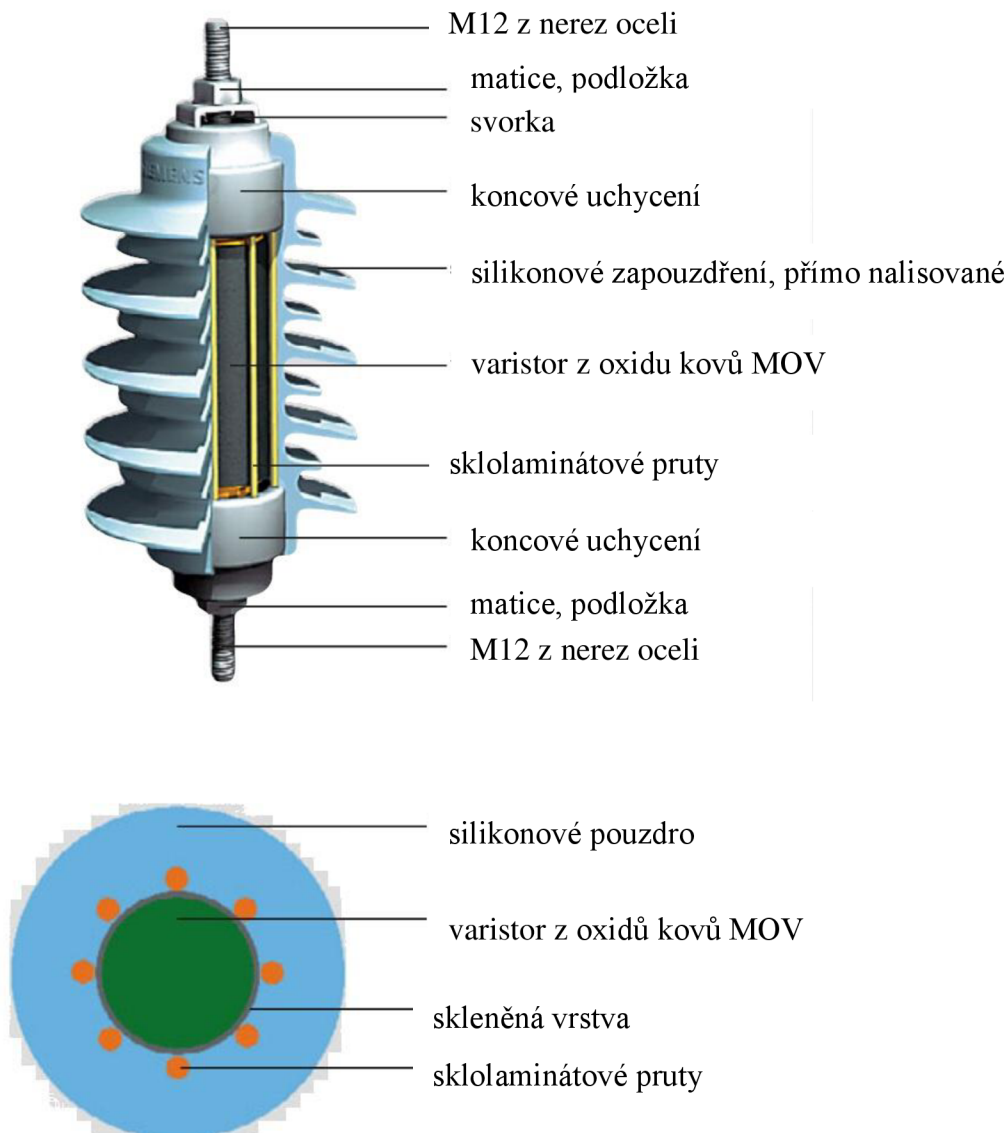
Použité přístroje a pomůcky

Měření bude probíhat na svodiči přepětí od firmy Siemens, typ 3EK7 315 katalogové hodnoty můžeme vidět v Tab. 7-1. Použitý svodič přepětí v řezu můžeme vidět na Obr. A-1. Nominální hodnoty uvedené na svodiči jsou: $U_r = 31,5$ kV; $U_c = 25,2$ kV; $I_n = 10$ kA; $I_s = 20$ kA. Testování bude probíhat pomocí impulzního generátoru a příslušenství od firmy Haefely, jak můžeme vidět na schématu zapojení, viz. Obr. 7-3. Generátor musí být nastaven na generaci impulsů 8/20, tuto konfiguraci můžeme vidět na Obr. 7-2.

Maximální výbojové napětí						BIL*
1 kA	3 kA	5 kA	10 kA	15 kA	20 kA	
8/20 μ s	8/20 μ s	8/20 μ s	8/20 μ s	8/20 μ s	8/20 μ s	
[kV cr]	[kV cr]	[kV cr]	[kV cr]	[kV cr]	[kV cr]	[kV]
67,9	73,7	77,9	83,8	90,5	96,4	242

*BIL - základní izolační hladina

Tab. 7-1 Hodnoty uvedené výrobcem v katalogu [10]

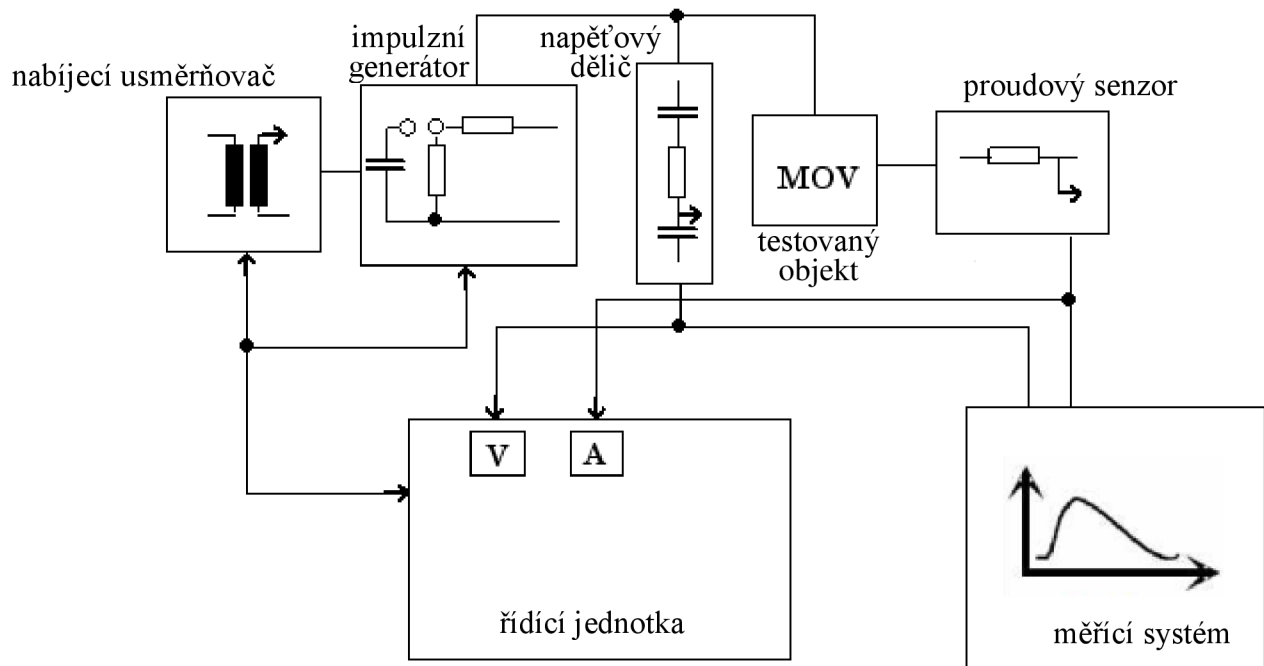


Obr. 7-1 Pohled na řezy svodiče přepětí [10]- upraveno autorem



Obr. 7-2 Zapojení pracoviště, jde vidět i konfigurace generátoru – archiv autora

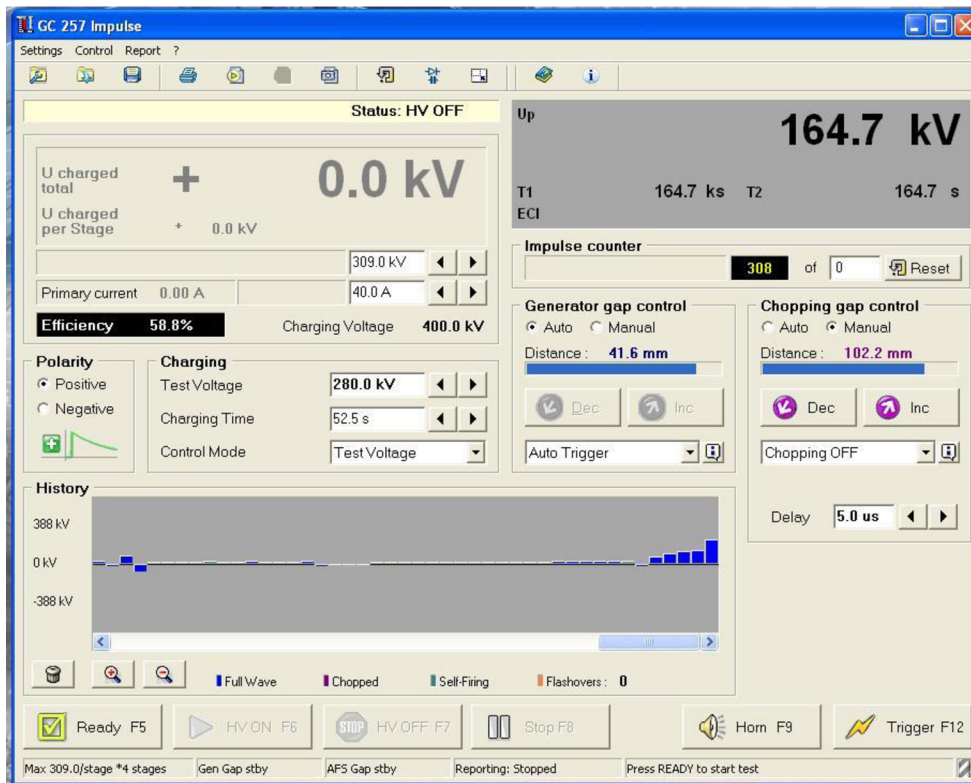
7.3 Schéma zapojení



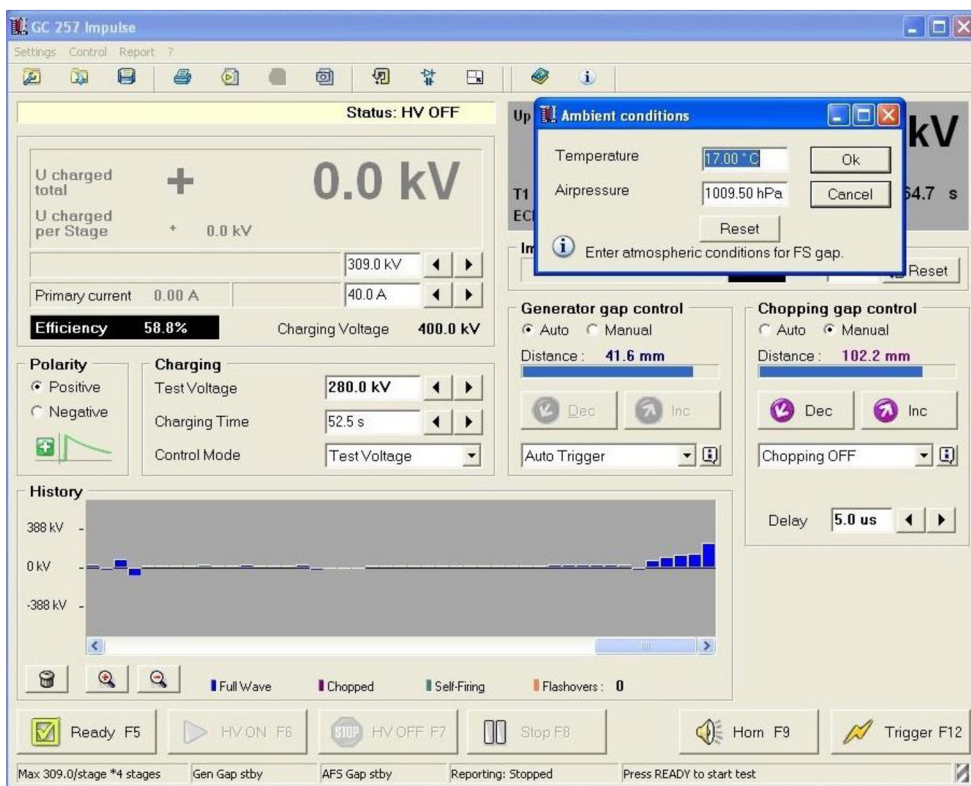
Obr. 7-3 Schéma zapojení

7.4 Postup měření

1. Studenti budou seznámeni s danou problematikou a zřízenými použitými při měření.
2. Ovládání měřicího pracoviště probíhá za pomoci programu GC 257 Impulse, náhled na prostředí tohoto programu je možné vidět na Obr. 7-4, případně na Obr. 7-5.
3. Budeme nabíjet generátor na výbojové napětí v rozmezí 160 kV až 300 kV po kroku 20 kV.
4. Provedeme testování podle bodu 3, studenti budou moci během testování sledovat průběhy napětí a proudů na svodiči, které sleduje měřicí systém. Následně, po dokončení měření studentům přeneseme data na paměťové médium.
5. Studenti z naměřených hodnot sestaví závislost zbytkových napětí na výbojovém proudu a porovnájí hodnoty zbytkových napětí s napětími, které udává výrobce, měření zhodnotí.



Obr. 7-4 Prostředí programu GC 257 Impulse – archiv autora



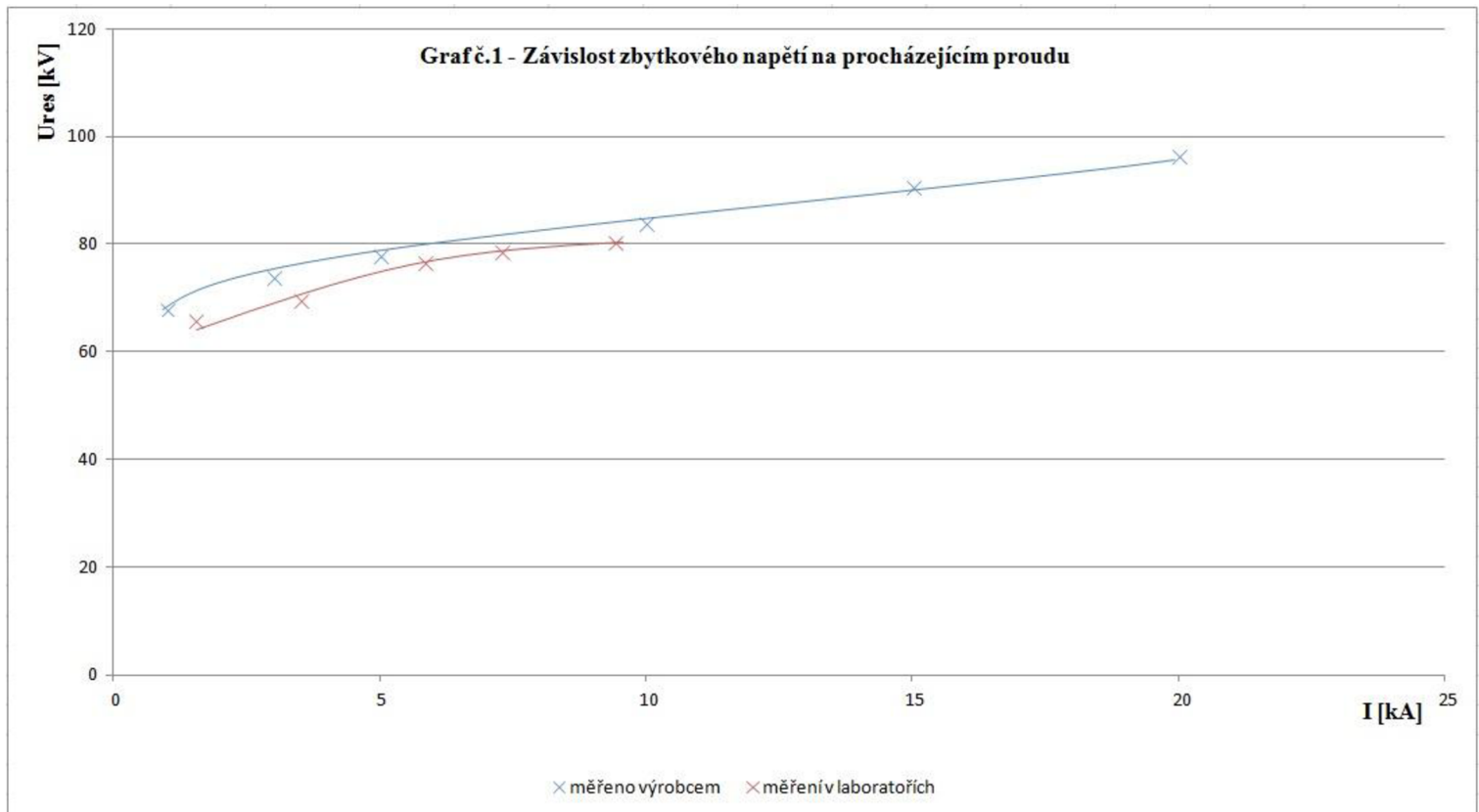
Obr. 7-5 Náhled na nastavení teploty a tlaku – archiv autora

7.5 Vypracování

Naměřené hodnoty byly zaznamenány do tabulky a porovnány v grafu s údaji, které udává výrobce v katalogu.

číslo měření	1	2	3	4	5
měřený proud [kA]	1,54	3,53	5,85	7,28	9,43
výbojové napětí [kV]	65,96	69,75	76,68	78,56	80,46

Tab. 7-2 Tabulka s naměřenými hodnotami



Obr. 7-6 Výsledek měření zpracovaný graficky

7.6 Zhodnocení měření

Měření jsme provedli podle výše uvedeného návodu, naměřené hodnoty jsme uvedli v tabulce č. 7-2 a následně jsme výsledky měření zhodnotili v grafu, kde jsme porovnali námi naměřené hodnoty s hodnotami, které uvádí výrobce. Z grafu č. 1 je patrné, že námi naměřené hodnoty nepřesáhli nikde hodnotu udanou výrobcem, tudíž svodič přepětí vyhověl. Měřili jsme ovšem pouze do proudu o hodnotě 9,43 kA, dále už jsme na dané konfiguraci impulzního generátoru od firmy Haefely měřit nedokázali, z důvodu nedostatečného nabíjecího napětí. Pro další měření by musela přijít na řadu změna konfigurace.

8 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá problematikou přepětí v elektrických sítích, touto problematikou se zabývá první část bakalářské práce. Druhá část práce je věnována možným ochranám proti přepětí a jejich vlastnostem. Poslední teoretická část je věnována standardům svodičů přepětí a jejich testování, informace pro tuto část byly čerpány z norem. Následně byl proveden návrh laboratorní úlohy na základě poznatků získaných z norem, katalogu výrobce a možností, které nabízí laboratoře v objektu Technické 14 – Vědeckotechnického parku profesora Lista, kde bylo testování svodiče provedeno za pomoci pana Ing. Michala Krbala. Naměřené hodnoty byly zpracovány a uvedeny v kapitole č.7. Laboratorní úlohu lze pro studenty bakalářského, popřípadě inženýrského studia provozovat pouze jako demonstrativní, protože se při testování pracuje s VVN (velmi vysokým napětím) a velmi drahým zařízením.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HASMAN, T. *Přepětí v elektroenergetických soustavách*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 129 s. ISBN 80-010-2952-2.
- [2] TOMAN, P., DRÁPELA J., MIŠÁK S., ORSÁGOVÁ J., PAAR M., TOPOLÁNEK D., BOK J., NOVOTNÝ J., ŠKODA J. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [3] STRAPKO, M. *Svodiče přepětí, jejich konstrukce a použití v elektrizační soustavě: Structure of Surge Arresters and Their Application in Power System*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27584. Bakalářská. VUT Brno.
- [4] ROUS, Z. *Přepěťové ochrany v elektrických instalacích do 1 000 V*. 1. vyd. Praha: IN-EL, 1999, 148 s. ISBN 80-862-3006-6.
- [5] Poistky a zvodice prepätia. *Silnoprúdové zariadenia: Elektronická učebnica* [online]. 2011 [cit. 2013-11-20]. Dostupné z: http://www.siz.6f.sk/?page_id=60
- [6] ČSN EN 60099-4 ed. 2. *Svodiče přepětí - Část 4: Omezovače přepětí bez jiskřišť pro sítě střídavého napětí*. 2005.
- [7] ČSN EN 60099-5. *Svodiče přepětí - Část 5: Doporučení pro volbu a použití*. 1999.
- [8] ABB. *High Voltage Surge Arresters - Buyer's Guide*. 2012. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/5e7929863c37055ac1257ab6004619da/\\$file/1HSM%209543%2012-00%20Surge%20Arresters%20Buyers%20Guide%20Edition%209.2%202012-08%20-%20English.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/5e7929863c37055ac1257ab6004619da/$file/1HSM%209543%2012-00%20Surge%20Arresters%20Buyers%20Guide%20Edition%209.2%202012-08%20-%20English.pdf)
- [9] HINRICHSEN V. *Metal-Oxide Surge Arrester in High-Voltage Power Systems*. Berlin, 2011. Dostupné z: http://www.energy.siemens.com/mx/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/surge-arresters-and-limiters/aboutus/Arrester_Book_Ed%20_3_en.pdf
- [10] 3EK7 Medium Voltage Silicone Insulated Surge Arresters. In: *Siemens* [online]. [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/surge-arresters-and-limiters/downloads/h51-catalogue-3ek7-iec-ansi-english.pdf>