

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Metodika zkoušek impulsním napětím – výkonové
transformátory**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. David KOPEČEK**
Osobní číslo: **E12N0011K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Metodika zkoušek impulsním napětím - výkonové transformátory**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zabývejte se velmi stručně procesem vzniku a šíření atmosférických přepětí, důvody pro stanovení odolnosti proti těmto jevům (koordinace izolace) a uveďte základní soubor norem, které s touto problematikou bezprostředně souvisí.
2. Zpracujte rozbor chování výkonového transformátoru vystaveného tomuto typu napětí.
3. Analyzujte parametry obvodu pro generování atmosférických impulzů. Uveďte, které parametry obvodu (včetně zkoušence) ovlivňují tvar impulzu a jakým způsobem.
4. Popište používané zkušební postupy a zaměřte se na možnosti záznamu průběhu zkoušky a jejich hodnocení (z hlediska měřicí a záznamové techniky) a nástroje pro analýzu poruch.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. soubor norem ČSN EN 60076
2. soubor norem ČSN EN 60060
3. ČSN EN 61083

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předmětem této předkládaná diplomové práce je proces vzniku atmosférického přepětí a jeho účinku na transformátory. Dále je práce zaměřena na zkušební postupy zkoušek výkonových transformátorů rázovým generátorem napětí, na jejich záznam a na nástroje pro analýzu poruch.

Klíčová slova

Atmosférický impuls, koordinace izolace, výkonový transformátor, jiskřiště, zemnicí lano, analýza poruch, ...

Abstract

The subject of the submitted thesis is the process of atmospheric overvoltage and its effect on transformers. Further work is focused on testing procedures testing of power transformers voltage impulse generator, their recording and analysis tools disorders.

Key words

Atmospheric impulse, insulation coordination, power transformer, spark gap, grounding cable, failure analysis, ...

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 1.5.2014

Bc.David Kopeček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Eva Müllerové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1. PROCES VZNIKU A ŠÍŘENÍ ATMOSFÉRICKÉHO PŘEPĚTÍ	12
1.1 OBECNĚ	12
1.2 VZNIK A ŠÍŘENÍ ATMOSFÉRICKÉHO IMPULZU	12
1.3 ODVOZENÍ TELEGRAFNÍCH ROVNIC	14
1.4 KOORDINACE IZOLACE	18
1.4.1 Statistická metoda	19
1.4.2 Konvenční metoda	20
1.5 SOUBOR NOREM	22
2. TEORETICKÝ ROZBOR CHOVÁNÍ VÝKONOVÉHO TRANSFORMÁTORU	23
2.1 POMĚRY NA CÍVCE S UZEMNĚNÝM KONCEM	24
2.2 POMĚRY NA CÍVCE S OTEVŘENÝM KONCEM PŘI JEDNOTKOVÉM RÁZU	30
2.3 ODEZVY ATMOSFÉRICKÝCH JEVŮ NA VINUTÍ TRANSFORMÁTORU	33
2.4 VÝSLEDKY	36
2.5 VLIV ROZMĚRŮ NA POČÁTEČNÍ ROZLOŽENÍ	37
2.6 STÍNĚNÍ	38
2.7 PROKLÁDANÁ VINUTÍ	39
3. PARAMETRY OBVODU PRO GENEROVÁNÍ ATMOSFÉRICKÝM IMPULZŮ	41
3.1 ZKUŠEBNÍ OBVOD	41
3.2 HLAVNÍ OBVOD	43
3.3 OBVOD PRO MĚŘENÍ	44
3.4 TVARY VLN	45
3.5 PRINCIP OVLIVŇOVÁNÍ TVARU VLNY	45
3.5.1 Vysokoimpedanční vinutí ($L_t > 100 \text{ mH}$)	46
3.5.2 Nízkoimpedanční vinutí ($L_t < 100 \text{ mH}$)	47
3.6 KALIBRACE	50
4. ZKUŠEBNÍ POSTUPY U ZKOUŠKY ATMOSFÉRICKÝM IMPULZEM	52
4.1 ZKUŠEBNÍ METODY	52
4.1.1 Obecné požadavky	52
4.1.2 Pořadí zkoušek	53
4.1.3 Zkoušky impulzem na fázových svorkách	53
4.1.4 Zkoušky impulzem svorky N	54
4.1.5 Metoda přepětí přeneseného na vinutí nižšího napětí	54
4.1.6 Zapojení při zkoušce	55
4.2 MĚŘÍCÍ A ZÁZNAMOVÁ TECHNIKA	56
4.2.1 Analogové a digitální záznamové systémy	56
4.2.2 Analogový záznam průběhu	56
4.2.3 Digitální záznam průběhu	57
4.3 NASTAVENÍ PARAMETRŮ OSCILOSKOPU	59
4.4 METODY VHODNÉ PRO DETEKCI PORUCH	61
4.4.1 Srovnávací metoda	61
4.4.2 Metoda přenosové funkce	62
4.4.3 Využití akustických odezev	64
4.5 PROTOKOLY Z IMPULZNÍCH ZKOUŠEK	65

ZÁVĚR	67
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	68
SEZNAM OBRÁZKŮ	69
SEZNAM TABULEK.....	70

Seznam symbolů a zkratk

R	Elektrický odpor	[Ω]
C	Kapacita	[F]
L	Indukčnost	[H]
U	Napětí	[V]
I	Proud	[A]
Z	Impedance	[Ω]
f	frekvence	[Hz]
γ	konstanta šíření	[-]
T_1	doba čela	[s]
T_2	doba půltýla	[s]
Δx	délkový element	[m]
ω	úhlová frekvence	[rad s ⁻¹]
ρ	koeficient odrazu rázové vlny	[-]
λ	vlnová délka	[m]
$\sigma_{1,2}$	součinitelé přenosu rázové vlna napětí	[-]
q_0	náboj na kapacitě mezi závity	[C]

Úvod

Předkládaná práce se zabývá metodikou zkoušek atmosférickým impulsním napětím výkonových transformátorů. Účelovou funkcí těchto zkoušek je ověření jakosti izolace výkonového transformátoru tak, aby byl schopen odolávat ve zvolené napěťové hladině atmosférickým přepětím, vzniklým během bouřky.

První část této práce popisuje proces vzniku a šíření atmosférického přepětí po vedení, dále se věnuje koordinaci izolace.

Druhá část se zabývá rozbořem chování transformátoru, který je vystaven tomuto typu přepětí, především rozložení napětí na vinutí.

Třetí část obsahuje analýzu obvodu pro generování atmosférického impulzu, jeho parametry ovlivňující tvar a vlastnosti impulzu.

Poslední kapitola navazuje na zkušební postupy a zaměřuje se na záznamy průběhů zkoušek, metodami vhodnými pro detekci poruch a jejich vyhodnocení.

1. Proces vzniku a šíření atmosférického přepětí

1.1 Obecně

Každou hodinu se na naší planetě odehrává na dva tisíce bouří a Zemi přitom zasáhne přibližně jeden milion blesků. Bleskům se nelze bránit, je však možné technicko-organizačními opatřeními zabránit škodám na majetku a zdraví. Blesk je přírodní elektrostatický výboj produkovaný během bouřky, který je doprovázen emisí světla. Rychlost blesku se pohybuje asi 60.000 m/s s rozptylem energie až 500 MJ a nábojem 1-5 C. Průměrná energie blesku je 250 kWh, doba trvání přibližně 0,25 s. Napěťová hodnota dosahuje až 100 MV, průměrná hodnota elektrického proudu je asi 30-40 kA. Teplota bezprostředně kolem bleskového kanálu dosahuje hodnot 10.000 až 30.000 °C. Elektřina procházející kanály výboje rychle zahřívá okolní vzduch, který v důsledku prudké expanze vytváří charakteristický zvuk – hrom.

1.2 Vznik a šíření atmosférického impulzu

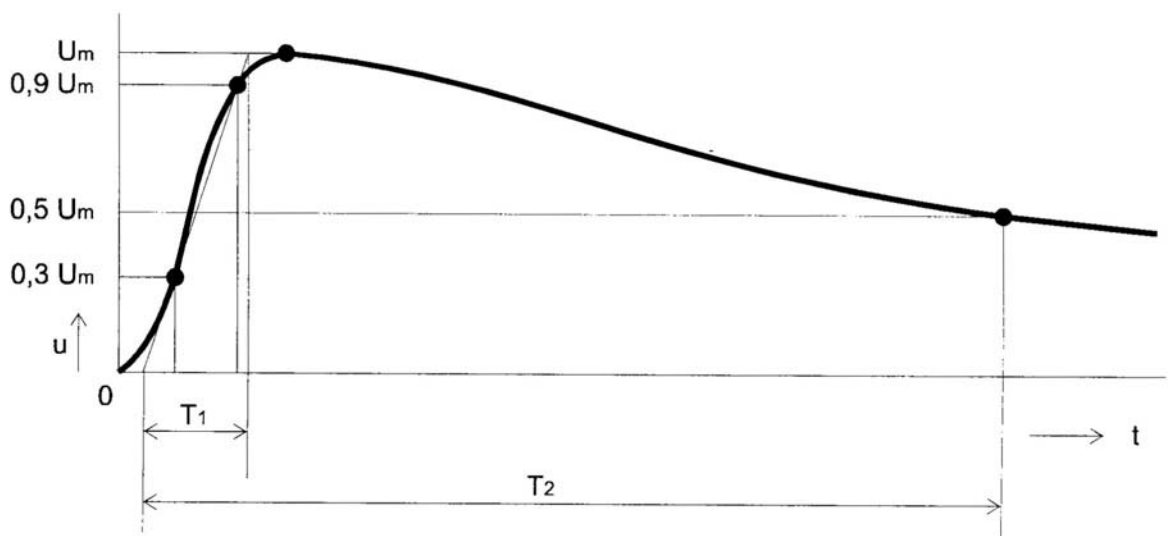
Vzniku blesku předchází mocná elektrická polarizace kladně a záporně nabitých částic v mraku nebo ve vzduchu. Padající kapky se elektricky polarizují během průchodu přírodními elektrickým polem atmosféry, ledové částice se nabíjejí elektrostatickou indukcí. Kladně nabitě krystaly mají tendenci stoupat nahoru a vytvářejí kladný náboj vrcholu mraku a záporně nabitě krystaly a kroupy padají do středních a dolních vrstev mraku, čímž vzniká oblast se záporným nábojem. Když se tímto způsobem nahromadí dostatečné množství kladných a záporných nábojů a vytvoří se dostatečně silné elektrické pole, dojde k elektrickému výboji, který vyrovnává rozdíl potenciálů mezi mraky nebo mezi mrakem a Zemí.

V České republice je počet úderů blesku v rozmezí 2 až 4 úderů na kilometr čtvereční. Celkový počet atmosférických výbojů během bouřky dosahuje v ČR hodnoty 50.000 blesků [3].

V obvodech silnoproudé elektrotechniky vznikají vlivem atmosférických výbojů rázové vlny, a to například přímým úderem blesku do venkovního vedení či působením

elektrostatické indukce při úderu blesku v okolí vedení. Porušení izolace nebo snížení izolační schopnosti vlivem přepětí vedoucí ke zkratům, je velmi nežádoucím důsledkem přepětových jevů. Z pozorování má asi 97 % blesků amplitudu proudu menší než 40 kA a jen asi 1 % má amplitudu mezi 90 až 100 kA.

Pro účely zkoušek elektrického zařízení, pro ověřování jejich odolnosti vůči namáhání atmosférickým přepětím, je tvar dohodnutého napětového impulsu rázové vlny dán normou ČSN EN 60060-1 a je na obr. 1.



Obr. 1. Charakteristické hodnoty rázové vlny [6].

Rázová vlna se charakterizuje:

- vrcholovou hodnotou napětí U_m , tj. maximální hodnota napětí, jíž vlna dosahuje,
- polaritou
- dobou čela T_1 , která je dána 1,67 násobným časem mezi 30 % a 90 % vrcholové hodnoty na vzestupné části křivky
- dobou do vrcholu, tj. časový interval mezi počátkem vlny a jejím vrcholem
- dobou půltýla T_2 , což je časový interval mezi počátkem vlny a okamžikem v týlu, kdy napětí pokleslo na polovinu vrcholové hodnoty. Počátek impulsu je definován jako průsečík spojnice 30 % a 90 % vrcholové hodnoty s časovou osou.

Matematicky se časový průběh rázové vlny vyjadřuje aproximativním výrazem

$$u(t) = U(e^{-at} - e^{-bt}), \text{ kde } U; a; b \text{ jsou konstanty} \quad (1.1)$$

Tvar impulzu se označuje zlomkem T_1/T_2 , přičemž doby T_1 a T_2 jsou v mikrosekundách. Normalizovaný atmosférický impulz napětí, tzv. normální rázová vlna napětí, má dobu čela $1,2 \mu\text{s}$ a dobu půltýlu $50 \mu\text{s}$ v předepsaných tolerancích. Označuje se jako vlna 1,2/50.

1.3 Odvození telegrafních rovnic

U elektrických soustav, jejichž geometrické rozměry jsou zanedbatelné v porovnání s délkou postupné vlny, délka postupné vlny $\lambda = v/f$, lze použít popisu se soustředěnými parametry. Naopak u obvodů, jejichž prvky nebudou již prostorově soustředěné, např. dlouhá vedení, budou napětí a proud nejen funkcemi času, ale též funkcí geometrických souřadnic, např. vzdálenosti x uvažovaného místa na vedení od začátku vedení. Rozhodnutí, zda budeme určitou soustavu popisovat obvodem se soustředěnými či rozloženými parametry, závisí na jejich geometrických rozměrech, na rychlosti změn elektromagnetického pole – kmitočtu f a na rychlosti v šíření vln obvodem.

Vedení s rozloženými parametry, kde jsou jednotlivé parametry rozloženy rovnoměrně, nazýváme homogenní vedení.

Uvažujme tedy jednofázové homogenní vedení tvořené dvojicí rovnoběžných vodičů.

Odvodíme základní rovnice pro napětí a proud homogenního vedení. Ve vzdálenosti x od začátku vedení vymežíme elementární dvojbran. Aby výstupní veličiny měly nezávisle proměnné jako vstupní veličiny, tj. čas t a délkovou souřadnici x , rozvineme v Taylorovu řadu a zanedbáme 2. a vyšší derivace:

$$u(t; x + \Delta x) = u(t; x) + \frac{\partial u(t; x)}{\partial x} \Delta x \quad (1.2)$$

$$i(t; x + \Delta x) = i(t; x) + \frac{\partial i(t; x)}{\partial x} \Delta x \quad (1.3)$$

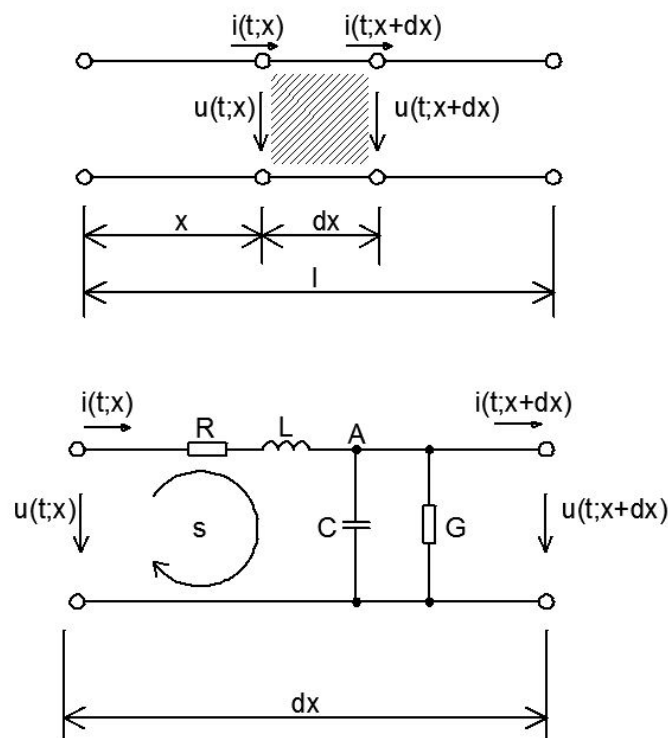
Podélné vlastnosti charakterizují parametry R a L , příčné vlastnosti parametry C a G . Na smyčku aplikujeme 2.Kirchhoffův zákon a na uzel A 1.Kirchhoffův zákon.

Po úpravě:

$$-\frac{\partial u(t; x)}{\partial x} = Ri(t; x) + L \frac{\partial i(t; x)}{\partial t} \quad (1.4)$$

$$-\frac{\partial i(t; x)}{\partial x} = Gu(t; x) + C \frac{\partial u(t; x)}{\partial t} \quad (1.5)$$

Řešením této soustavy lineárních rovnic je napětí $u=u(t;x)$ a proud $i(x)=i(t;x)$ v kterémkoli místě x a kterémkoliv čase t .



Obr. 2. K odvození rovnic homogenního vedení, vymezení délkového elementu a podélné parametry délkového vedení [1].

Eliminací proudu i z obou rovnic nalezneme vyjádření napětí homogenního vedení homogenní diferenciální rovnicí 2.řádu.

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + RG u + (LG + RC) \frac{\partial u}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0 \quad (1.6)$$

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} + RG i + (LG + RC) \frac{\partial i}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} = 0 \quad (1.7)$$

Provedeme-li symbolicko komplexní zobrazení napětí a proudu homogenního vedení, které je v harmonickém ustáleném stavu:

$$u(t;x) \leftrightarrow U(x)e^{j\omega t}; \quad i(t;x) \leftrightarrow I(x)e^{j\omega t}$$

Fázory U , I tedy již nejsou komplexními konstantami, ale jsou komplexními funkcemi proměnné x . Parciální rovnice 1.4 a 1.5 přecházejí na obyčejné diferenciální rovnice:

$$\frac{d\bar{U}(x)}{dx} - (R + j\omega L)\bar{I}(x) = 0 \quad (1.8)$$

$$\frac{d\bar{I}(x)}{dx} - (R + j\omega L)\bar{U}(x) = 0 \quad (1.9)$$

$$\frac{d^2\bar{U}(x)}{dx^2} - (R + j\omega L)(G + j\omega C)\bar{U}(x) = 0 \quad (1.10)$$

$$\frac{d^2\bar{I}(x)}{dx^2} - (R + j\omega L)(G + j\omega C)\bar{I}(x) = 0 \quad (1.11)$$

$$\text{řešením je: } \bar{U}(x) = \bar{A} \cdot e^{\gamma x} + \bar{B} \cdot e^{-\gamma x} \quad (1.12)$$

$$\text{kde komplexní konstanta } \gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (1.13)$$

se nazývá *konstanta šíření* a \bar{A} , \bar{B} jsou integrační konstanty.

Z rovnice 1.5 plyne:

$$\bar{I}(x) = -\frac{1}{R + j\omega L} \frac{d\bar{U}}{dx} \quad (1.14)$$

dosazením za $\frac{d\bar{U}}{dx}$ z rovnice 1.12 dostáváme:

$$\bar{I}(x) = -\frac{\bar{A}}{\bar{Z}_0} e^{\gamma x} + \frac{\bar{B}}{\bar{Z}_0} e^{-\gamma x} \quad (1.15)$$

$$\text{kde komplexní konstanta } \bar{Z}_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1.16)$$

se nazývá *vlnová impedance*.

Vlnová impedance Z_0 a konstanta šíření γ charakterizují vlastnosti homogenního vedení a nazýváme je též *provozními parametry homogenního vedení*.

Při atmosférickém výboji vstupuje na vedení rázová vlna, která postupuje danou rychlostí v . Když tato postupná vlna dospěje k místu nehomogenity, například při spojení kabelového a venkovního vedení, zčásti vniknou do vedení 2 a postupují v něm jako postupné vlny a zčásti se odrazí a postupují zpět po vedení 1 jako vlny odražené.

$$u_o = f(x + v_1 t); \quad i_o = \frac{1}{Z_{01}} f_0(x + v_1 t) \quad (1.17)$$

$$\text{ve vedení 1 je tedy napětí: } u_1 = u_h + u_o = f_h(x - v_1 t) + f_0(x - v_1 t) \quad (1.18)$$

$$\text{a proud: } i_1 = i_h - i_o = \frac{1}{Z_{01}} f_h(x - v_1 t) - \frac{1}{Z_{01}} f_0(x + v_1 t) \quad (1.19)$$

$$\text{Odražené a postupující vlny lze vyjádřit vztahy: } u_o = \rho \cdot u_h; \quad i_o = \rho \cdot i_h \quad (1.20)$$

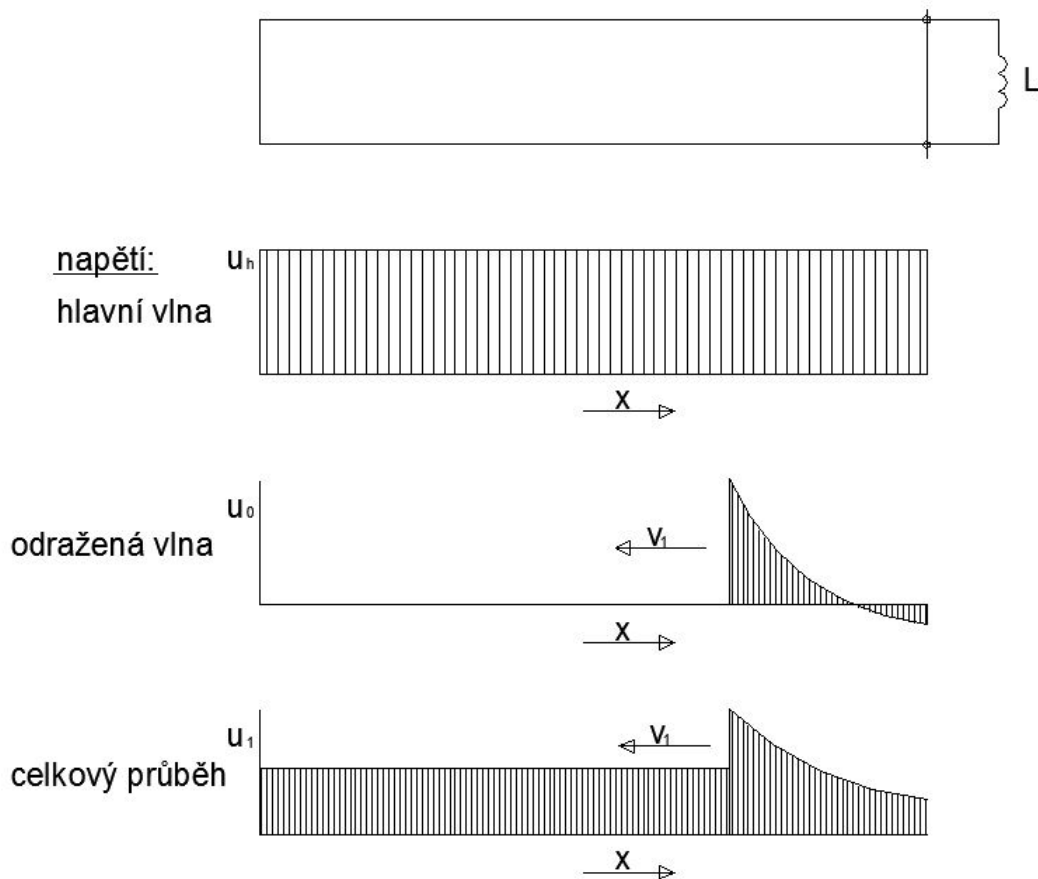
$$u_2 = \rho_1 \cdot u_h; \quad i_2 = \rho_2 \cdot i_h$$

$$\text{kde } \rho \text{ je koeficient odrazu rázové vlny } \rho = \frac{Z_{02} - Z_{01}}{Z_{01} + Z_{02}} \quad (1.21)$$

a σ_1 a σ_2 jsou součinitelé přenosu rázové vlna napětí, resp. proudu

$$\sigma_1 = \frac{2Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} = 1 + \rho; \quad \sigma_2 = \frac{2Z_{01}}{Z_{01} + Z_{02}} = 1 - \rho \quad (1.22)$$

Z rovnic 1.18 a 1.19 je patrné, že při spojení kabelového a venkovního vedení se celkové napětí v prvním vedení zvětší (nejvýše dvojnásobně) a celkový proud se zmenší. Vzniká tak zvětšené namáhání izolačního systému obou vedení. Uvedený způsob lze aplikovat na vedení zakončená soustředěným prvkem R , L , C nebo jejich kombinací, např. u výkonových transformátorů [1].



Obr. 3. Šíření vln napětí podél ideálního vedení zakončeného cívku [1].

1.4 Koordinace izolace

Základní princip koordinace izolace spočívá ve volbě elektrické pevnosti zařízení ve vztahu k provozním napětím a přepětím, která se mohou vyskytovat v síti, pro kterou je zařízení určeno, s respektováním provozních podmínek okolí a charakteristik použitých ochranných zařízení.

Metoda koordinace izolace spočívá ve volbě nejvyššího napětí pro zařízení společně se souborem normalizovaných výdržných napětí, která charakterizují izolaci zařízení požadovanou pro použití.

Izolace zařízení musí trvale vydržet provoz při nejvyšším napětí (efektivní hodnoty U_m). Izolaci je třeba vhodně nadimenzovat a zkouškami ověřit její odolnost. Rozlišujeme statistickou a konvenční metodu [2].

1.4.1. Statistická metoda

Principem této metody je volba dvou reprezentujících hladin, a to hladina elektrické pevnosti, označujeme jako statistické výdržné napětí a hladina přepětí, označujeme jako *statistické přepětí*. Statistické výdržné napětí se volí nad statistickým přepětím s určitou bezpečností, vyjádřenou bezpečnostním činitelem. Tomuto činiteli v konkrétním případě odpovídá určitá pravděpodobnost poruchy. Statistické výdržné napětí se získá ze statistického zpracování výsledků zkoušek. Je to napětí, které izolace vydrží s dohodnutou 90% pravděpodobností. Statistické výdržné napětí se rovná nebo je vyšší než jmenovité výdržné napětí, které určuje izolační hladina zařízení.

V tab. 1 jsou uvedeny výsledky metody nahoru-dolů a v tab.2 výsledky metody s více hladinami, které jsem provedl v laboratoři VN. Křížky jsou označeny stavy, kdy došlo k porušení izolace – přeskoku. Měření bylo provedeno pomocí rázového generátoru vlny 1,2/50, napětí bylo měřeno vrcholových voltmetrem připojeným na dělič s poměrem 533:1. Zároveň byla generovaná vlna snímána na digitálním osciloskopu LeCroy Wavepro 950.

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39			
185																																										
190					0		0																																			
					92		91																																			
195		0	x		x		0																					0		0									0			
		94	93		94		94																					94		93										93		
200	x	x							0						0								0	0	x		x		0										x			
	96	96						96							96								96	96	96		96		96		96								96			
205									0				x		0							x	x	x						0									x			
									99				99		99								99	99	99					99										99		
210										0		x			0							x									0		0							x		
										101		101			101							101									101		101								102	
215											x					0		x												x		0		x								
											104					104		103												104		104		104								
220																	x																							x		
																	106																							106		

Tab. 1. Zkouška metodou nahoru-dolů

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
70																											0
	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
75																											0
	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
80																											0
	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39	39
85																											0
	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
90																											0
	44	44	43	44	44	44	44	44	44	44	43	43	44	43	44	44	44	43	43	43	43	43	43	43	44	44	0
95		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X							X		X	X					14
	46	45	46	45	46	44	45	45	45	45	45	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	46	44	46	46	46	46
100	X			X					X						X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	12
	48	48	48	48	48	48	48	49	48	48	48	48	48	48	48	48	48	49	47	52	52	48	48	47	47	47	12
105	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X								17
	53	49	49	49	49	50	49	51	51	49	49	50	51	51	51	51	51	51	52	51	51	51	51	51	51	51	17
110	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X		X		X		X	X	20
	53	53	51	53	53	53	53	51	53	51	52	51	56	53	54	53	53	53	53	53	52	53	53	53	55	56	20

Tab. 2. Zkouška metodou více hladinami

1.4.2. Konvenční metoda

U zařízení, jako jsou transformátory, zůstává po průrazu izolace trvale poškozená a není proto vhodné aplikovat statistickou metodu a je třeba uvažovat konvenční výdržnou pevnost, která se ověří aplikací malého počtu impulzů o velikosti jmenovitého výdržného napětí. Konvenční výdržná pevnost musí být o bezpečnou hodnotu vyšší než konvenční maximální přepětí.

V níže uvedení tabulce jsou izolační požadavky rozděleny do kategorií na základě svého nejvyššího napětí U_m . Tomu odpovídají příslušná jmenovitá výdržná napětí při atmosférickém impulzu a jmenovité krátkodobé indukované nebo přiložené střídavé výdržné napětí, viz tab. 3 a tab. 4.

Kategorie vinutí	Nejvyšší napětí pro zařízení U_m kV	Zkoušky				
		Atmosférický impulz (LI) (viz kapitola 13 a 14)	Spínací impulz (SI) (viz kapitola 15)	Dlouhodobá střídavá zkouška (ACLD) (viz 12.4)	Krátkodobá střídavá zkouška (ACSD) (viz 12.2 nebo 12.3)	Přiložené střídavé napětí (viz kapitola 11)
Plná izolace	$U_m \leq 72,5$	Typová (poznámka 1)	Nepoužívá se	Nepoužívá se (poznámka 1)	Kusová	Kusová
Plná a redukovaná izolace	$72,5 < U_m \leq 170$	Kusová	Nepoužívá se	Zvláštní	Kusová	Kusová
	$170 < U_m < 300$	Kusová	Kusová (poznámka 2)	Kusová	Zvláštní (poznámka 2)	Kusová
	$U_m \geq 300$	Kusová	Kusová	Kusová	Zvláštní	Kusová

Tab. 3. Různé kategorie vinutí dle nejvyššího napětí U_m [4].

Izolační požadavky pro výkonové transformátory a odpovídající izolační zkoušky jsou udávány pro každé vinutí a jeho svorky. Rozlišujeme zkoušky:

- **Zkouška atmosférickým impulzem (LI) na fázových svorkách** – zkouškou se má ověřit impulzní výdržná pevnost zkoušeného transformátoru, když je impulz přiložen k jeho fázovým svorkám.

- **Zkouška atmosférickým impulzem (LI) na svorce N** – zkouška má ověřit výdržné impulzní napětí svorky N a k ní připojených vinutí k zemi a k ostatním vinutím podél zkoušeného vinutí.

Nejvyšší napětí pro zařízení U_m	Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulzu	Jmenovité krátkodobé indukované nebo přiložené střídavé výdržné napětí
kV efektivní hodnota	kV vrcholová hodnota	kV efektivní hodnota
3,6	20	10
7,2	40	20
12	60	28
17,5	75	38
24	95	50
	125	
36	145	70
	170	
52	250	95
60	280	115
72,5	325	140
100	380	150
123	450	185
145	550	230
170	650	275
	750	325

POZNÁMKA Tečkované čáry mohou vyžadovat dodatečné zkoušky fáze-fáze pro ověření, že byly splněny požadavky na výdržné napětí fáze-fáze.

Tab. 4. Jmenovitá výdržná napětí pro vinutí transformátoru s $U_m \leq 170\text{kV}$ [4].

1.5 Soubor norem

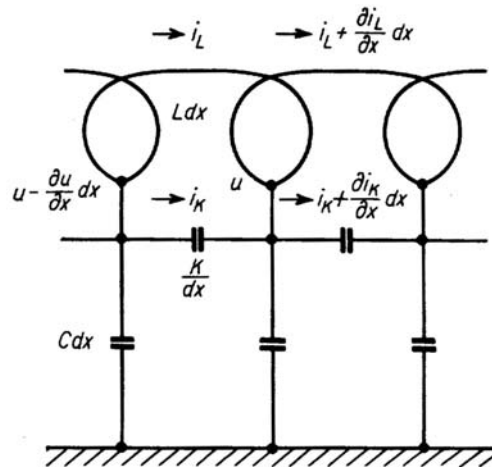
Touto problematikou se bezprostředně zabývají normy:

- ČSN EN 60060-1: Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky
- ČSN EN 60071-1: Koordinace izolace, část 1: Definice, principy a pravidla
- ČSN EN 60076-3: Výkonové transformátory – Část 3: Izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdušné vzdálenosti
- ČSN EN 60076-4: Výkonové transformátory – Část 4 Průvodce zkouškami atmosférickým a spínacím impulzním napětím – Výkonové transformátory a tlumivky
- ČSN EN 61000-4-5: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) Část 4: Zkušební a měřicí technika, Oddíl 5: Rázový impuls - zkouška odolnosti
- ČSN EN 61083-1: Přístroje a programové vybavení pro měření při zkouškách impulzy vysokého napětí - Část 1: Požadavky na přístroje

2. Teoretický rozbor chování výkonového transformátoru

Velikost přepětí na vinutích transformátorů připojených na venkovní vedení vzniknuvší atmosférickým přepětím jsou omezena jen svodiči přepětí a může dosáhnout takové výše, že ohrožuje jak izolaci vinutí proti zemi, tak i mezi závitovou izolaci vinutí. Protože studium rázových pochodů v transformátorech je velmi obtížné, je třeba nejdříve analyzovat nejjednodušší útvar a tím je jedno polohová cívka.

Cívka se chová k rázům napětí jako seskupení kapacit a indukčností. Na počátku převládá účinek kapacity, ke konci je rozhodující činitel magnetického pole a indukčnosti. Přechod mezi oběma stavy tvoří volné kmity celého seskupení. Budeme předpokládat, že na vstupní svorce působí jednotkový pravoúhlý ráz napětí. Na rozdíl od vedení je každý element (závit) cívky vázán se všemi ostatními elementy (závity) jak elektrostaticky, tak hlavně elektromagneticky. Byly vypracovány různé teorie cívky lišící se pohledem na vzájemné elektromagnetické působení elementů. Dále sledujeme teorii podle Wagnera, ten uvažuje náhradní schéma bezeztrátového vedení, doplněné mezi závitovými kapacitami, náhradní schéma je na obr. 4



Obr. 4. Náhradní schéma jedno polohové cívky [8].

x ... délka počítaná ve směru osy cívky od vstupní svorky ke konci

u ... okamžité napětí elementu (závitu) v místě x proti zemi

i_L ... okamžitý proud v závitu v místě x

i_K ... okamžitý proud kapacitou mezi sousedními závity v místě x

L ... celková indukčnost na osovou délku cívky

C ... kapacita proti zemi (paralelní) na jednotku délky cívky

K ... kapacita mezi závity (sériová) na jednotku délky cívky

Výsledná kapacita cívky proti zemi je pak C_L , výsledná kapacita mezi závity ke K/l . Na závit připadá kapacita k zemi Cdx a kapacita mezi závity K/dx . V místě x vinutí platí v okamžiku t , počítaném od okamžiku, kdy na vstupní svorku přijde vlna napětí, tyto rovnice:

$$-\frac{\tilde{\alpha}_L}{\tilde{\alpha}x} dx - \frac{\tilde{\alpha}_K}{\tilde{\alpha}x} dx = Cdx \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1.23)$$

$$i_K = \frac{K}{dx} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(-\frac{\partial u}{\partial x} dx \right) \quad (1.24)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} dx = Ldx \frac{\tilde{\alpha}_L}{\tilde{\alpha}t} \quad (1.25)$$

Po derivaci rovnice (1.23) podle t a dosazením vztahů do (1.24) a (1.25) získáme diferenciální rovnici pro napětí pro vinutí při rázu:

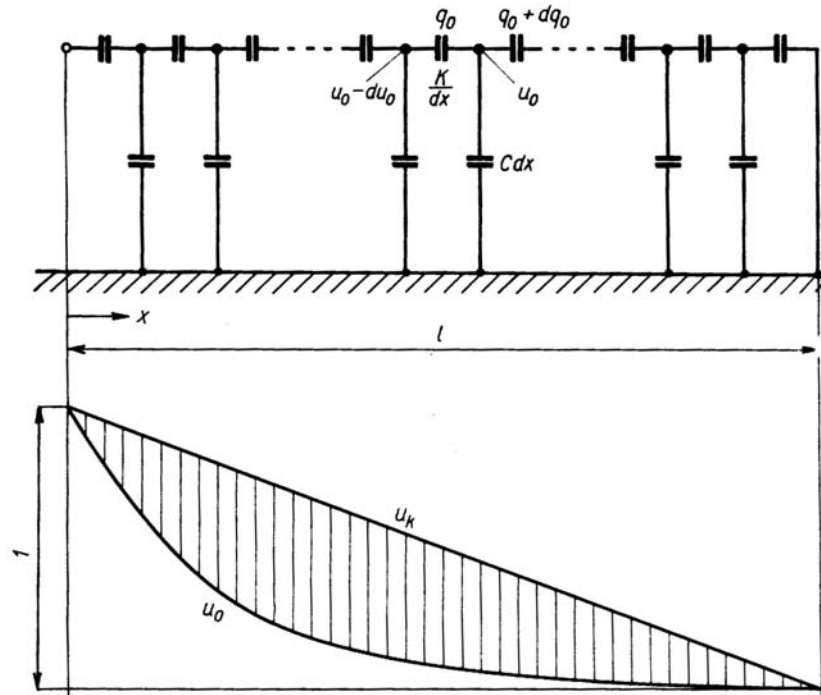
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - LC \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + LK \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2} \quad (1.26)$$

Dále je třeba rozlišit přechodový jev pro uzemněný a volný konec cívky.

2.1 Poměry na cívce s uzemněným koncem

Při řešení uvažujeme dva krajní případy.

- V okamžiku, kdy se na vstupní svorce objeví jednotkový pravoúhlý ráz napětí ($t=0$), se uplatňují jen kapacity vinutí. Náhradní schéma je na obr. 5



Obr. 5. Náhradní schéma jednofázové cívky

q_0 ... náboj na kapacitě mezi závitů

u_0 ... napětí na kapacitě proti zemi v místě x

Zde platí rovnice:

$$-dq_0 = Cdx \cdot u_0 \quad (1.27)$$

$$-du_0 = \frac{q_0}{K} dx \quad (1.28)$$

$$\text{po úpravě: } \frac{d^2 u_0}{dx^2} = \frac{C}{K} u_0 \quad (1.29)$$

řešením této rovnice je:

$$u_0 = A_0 e^{\gamma x} + B_0 e^{-\gamma x}, \text{ kde} \quad (1.30)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{C}{K}} \quad (1.31)$$

neznáme konstanty A_0 a B_0 získáme z okrajových podmínek:

- na vstupní svorce je jednotkový ráz napětí, $x=0$, $u_0=1$:

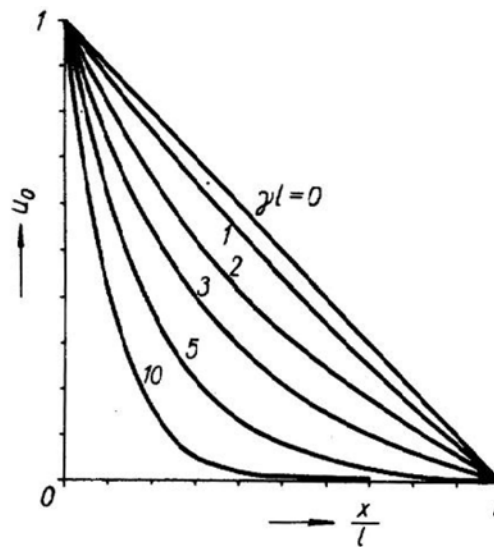
$$u_0=1=A_0+B_0 \quad (1.32)$$

- konec cívky je uzemněný, $x=1$, $u_0=0$:

$$u_0=0=A_0e^{\gamma l} + B_0e^{-\gamma l} \quad (1.33)$$

po dosazení konstant a úpravou se získá počáteční rozložení napětí

$$u_0 = \frac{\sinh \gamma(l-x)}{\sinh \gamma l} \quad (1.34)$$



Obr. 6. Počáteční rozložení napětí na cívce s uzemněným koncem pro různé γl [2].

- Po nekonečně dlouhé době od okamžiku, kdy se objevil na vstupní svorce jednotkový pravoúhlý ráz napětí ($t \rightarrow \infty$) nastává konečné rozložení napětí. Pro tento případ se všechny časové derivace položí nule, tj. řešením rovnice 1.26 dostáváme:

$$\frac{d u_k}{dx^2} = 0 \quad (1.35)$$

řešením je

$$u_k = A_k x + B_k \quad (1.36)$$

Neznáme konstanty A_k a B_k získáme z okrajových podmínek:

- na vstupní svorce je jednotkový ráz napětí, $x=0$, $u_k=1$:

$$u_k=1=B_k \quad (1.37)$$

- konec vinutí je uzemněný, $x=1$, $u_k=0$:

$$u_k=0=A_k l + B_k \quad (1.38)$$

Konečné rozložení je tedy:

$$u_k = 1 - \frac{x}{l} \quad (1.39)$$

Přechod z počátečního do konečného rozložení napětí je charakterizováno dějem, při němž vznikají tlumené elektromagnetické kmity, podmíněné indukčností, kapacitou a činným odporem jednotlivých částí vinutí. Nazýváme je *volné kmity vinutí*.

Při odvození rovnice pro volné kmity se vychází ze základní diferenciální rovnice 1.26, přičemž se řešení předpokládá ve tvaru:

$$u = U \sin \alpha x \cos \omega t \quad (1.40)$$

Po dosazení vztahu 1.38 do 1.26 se získá vztah mezi prostorovým (α) a časovým (ω) úhlovým kmitočtem jednotlivých stojatých vln

$$-\alpha^2 + LC\omega^2 + LK\alpha^2\omega^2 = 0 \quad (1.41)$$

odkud

$$\omega = \frac{\alpha}{\sqrt{LC\left(1 + \frac{K}{C}\alpha^2\right)}} \quad (1.42)$$

Pro $x=0$ a $x=1$ musí mít volné kmity v každém okamžiku nulovou hodnotu. Okrajová podmínka pro tyto kmity v místě $x=1$ bude splněna, když se do rovnice 1.40 dosadí

$$\alpha = \frac{n\pi}{l}, \text{ kde } n=1,2,3, \dots \quad (1.43)$$

Volné kmity mají tvar

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{n\pi}{l} x \cos \omega_n t \quad (1.44)$$

kde b_n jsou amplitudy jednotlivých harmonických kmitů. Získají se z podmínky, že pro $t=0$ musí suma rovnice 1.44 poskytnout diferenci mezi počátečním a konečným rozložením napětí, tj.

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{n\pi}{l} x = \frac{\sinh \gamma(l-x)}{\sinh \gamma l} - \left(1 - \frac{x}{l}\right) \quad (1.45)$$

Pro výpočet b_n je použit vztah

$$\int_0^1 \sin \frac{n\pi}{l} x \sin \frac{k\pi}{l} x dx = \begin{cases} 0 & \text{pro } n \neq k \\ \frac{1}{2} & \text{pro } n = k \end{cases} \quad (1.46)$$

potom se vynásobí obě strany v rovnici 1.45 výrazem $\sin \frac{k\pi}{l} x$, kde k je celé číslo a integruje od 0 do 1. Z toho

$$\begin{aligned}
 b_n &= \frac{2}{l} \int_0^l \left[\frac{\sinh \gamma(l-x)}{\sinh \gamma l} - \left(1 - \frac{x}{l}\right) \right] \sin \frac{n\pi}{l} x dx = \\
 &= \frac{2}{n\pi} \cdot \frac{(\gamma l)^2}{(\gamma l)^2 + (n\pi)^2} = -\frac{2}{n\pi} \cdot \frac{1}{1 + \frac{K}{C} \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2}
 \end{aligned} \tag{1.47}$$

Přidáním k volným kmitům konečné rozložení napětí se získá výsledný průběh napětí při rázovém ději

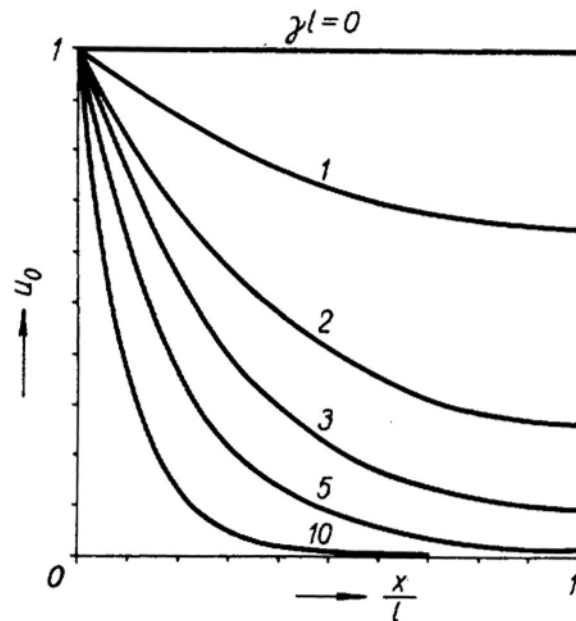
$$u_n = 1 - \frac{x}{l} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{n\pi}{l} x}{n \left[1 + \frac{K}{C} \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \right]} \cdot \cos \omega_n t \tag{1.48}$$

kde ω_n vychází z rovnice 1.42, dosadíme-li za α_n podle rovnice 1.43. Z toho plyne, že s rostoucím n se frekvence blíží hodnotě

$$f = \frac{\omega_{\infty}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LK}} \tag{1.49}$$

Toto je mezní kmitočet, kterým může cívka volně kmitat. S rostoucím n také poměrně rychle klesají amplitudy jednotlivých harmonických, takže pro praktické výpočty stačí uvažovat několik prvních členů.

Prostorové rozložení prvních tří harmonických v okamžiku, kdy se na vstupní svorce cívky s uzemněným koncem objeví pravoúhlý ráz napětí je na obr. 7



Obr. 7. Prostorové rozložení prvních tří harmonických na cívce s uzemněným koncem [2].

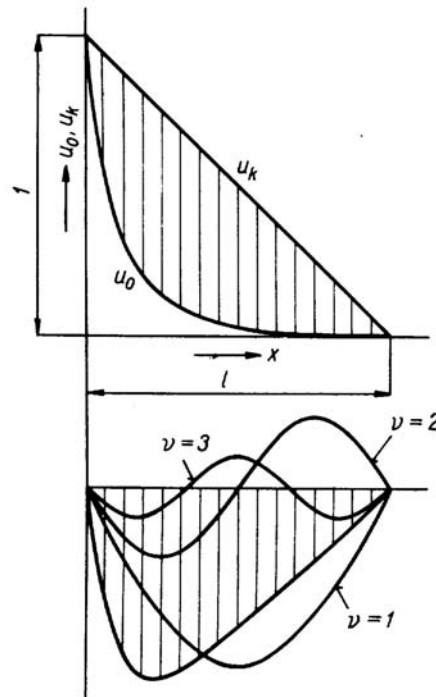
2.2 Poměry na cívce s otevřeným koncem při jednotkovém rázu

Pro zjištění počátečního rozložení se vychází opět z diferenciální rovnice 1.26, kde platí okrajové podmínky:

- na vstupní svorce je jednotkový ráz napětí : $u_0=1, x=1$
- konec cívky : $x=1, \left(\frac{\partial u_0}{\partial x}\right) = 0$.

Úpravou se získá počáteční rozložení napětí:

$$u_0 = \frac{\cos \gamma(x-l)}{\cos \gamma l} \quad (1.50)$$

Obr. 8. Počáteční rozložení napětí na cívkce s volným koncem pro různá γ [2].

Podmínka pro svorku je stejná jako u cívky s uzemněným koncem. Řešení má tedy tvar:

$$u(x, t) = \sum_n b_n \sin \alpha_n x \cos \omega_n t \quad (1.51)$$

z nutnosti platnosti okrajové podmínky $\left(\frac{\partial u_0}{\partial x}\right)_{x=l} = 0$ jsou možné jen hodnoty

$$\alpha_n = \frac{n\pi}{2l}, \text{ kde } n=1,3,5, \dots \quad (1.52)$$

Stanovení amplitud b_n se provede jako v předchozím případě. Platí:

$$b_n = -\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\gamma^2 l^2}{\left(\frac{n\pi}{2}\right)^2 + \gamma^2 l^2}, \text{ kde } n=1,3,5, \dots \quad (1.53)$$

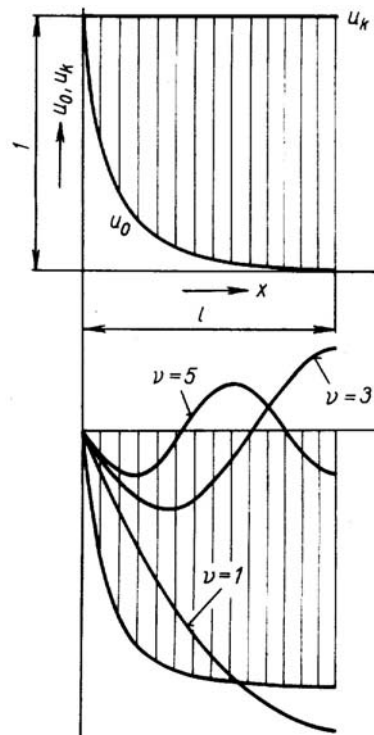
Výsledná rozdělení napětí na cívkce s volným koncem při rázu vyjadřuje vztah

$$u(x,t) = 1 - 4 \sum_n \frac{\gamma^2 l^2}{\left(\frac{n\pi}{2}\right)^2 + \gamma^2 l^2} \cdot \frac{\sin \frac{n\pi}{2l}}{n\pi} \cos \omega_n t, \quad (1.54)$$

kde $n=1,3,5, \dots$

V rovnici 1.54 udává první člen konečné rozložení napětí a druhý člen znázorňuje volné kmity cívky.

Prostorové rozložení prvních tří harmonických v okamžiku, kdy se na vstupní svorce cívky s volným koncem objeví pravoúhlý ráz napětí je na obr. 9.



Obr. 9. Prostorové rozložení prvních tří harmonických na cívce s volným koncem [2].

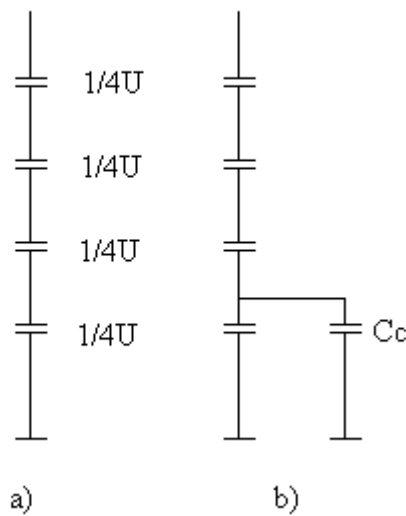
Pro kmitu plyne, že cívka s izolovaným koncem kmitá v prostorových čtvrtvlnách. Pro oba dva stavy platí, že v okamžiku dopadu rázové vlny má největší napětí proti zemi právě vstupní svorka. V následné době mohou během přechodného děje, během volných kmitů, jiné body dosáhnout vyššího napětí proti zemi.

Pokud jde o mezi závitové namáhání (podélný gradient), má cívka s uzemněným koncem v prvním okamžiku maximální hodnotu u vstupní svorky. Později se místo podélného gradientu posouvá podél cívky a také v blízkosti uzemněného konce cívky namáhání roste. U cívky s izolovaným koncem má podélný gradient maximální hodnotu u vstupu v prvním okamžiku, v blízkosti izolovaného konce zaniká na nulu.

2.3 Odezvy atmosférických jevů na vinutí transformátoru

Vinutí elektrických strojů je charakterizováno indukčností, kapacitou a činným odporem. Rezistivitu R a svod G z hlediska atmosférických namáhání neuvažujeme. Po přivedení atmosférického impulzu na vstupní svorky vinutí elektrického stroje se uplatní pouze kapacity vinutí. Indukčnost vinutí se v důsledku velké strmosti nárůstu napětí podle Lenzova zákona (cívka se brání prudkým nárůstům proudu) neuplatňuje. Kapacitu vinutí je třeba rozdělit na kapacitu proti kostře (příčná kapacita) a mezi sousedními závitů (podélná kapacita).

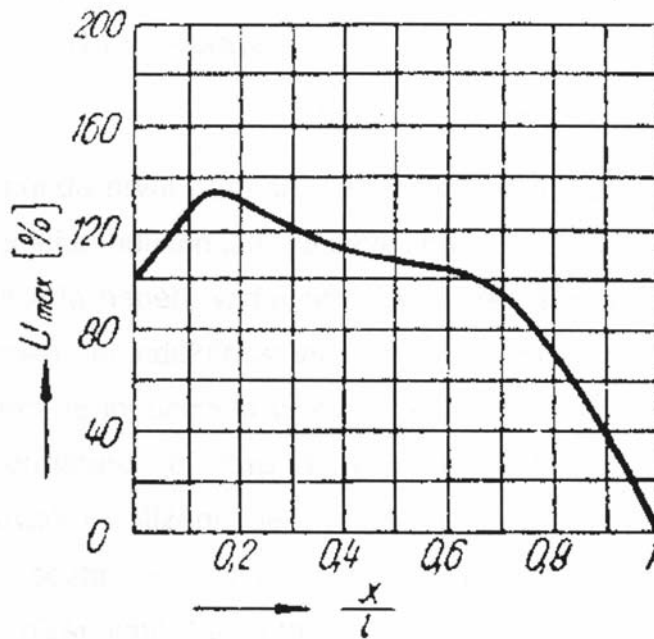
Pokud by vinutí mělo kapacity pouze mezi sousedními závitů, bylo by náhradní schéma podle obr. 10.a). Napětí na těchto kapacitách by se rozdělilo rovnoměrně za podmínky, že by šlo o homogenní vinutí a mezizávitové kapacity by měly všechny shodnou hodnotu. Ve skutečnosti se zde uplatňují i příčné kapacity. Na obr 10.b) je pro ilustraci připojena jedna příčná kapacita závitů C_C . Tím se zvýší celková kapacita tohoto závitů a rozložení napětí se znerovnoměrní; úbytek napětí na tomto závitů bude menší než jeho původní velikost $1/4 U$. Po připojení dalších příčných kapacit jednotlivých závitů, je vidět, že vstupní část vinutí má nejmenší celkovou kapacitu a je na ní největší úbytek napětí. Tím je proti ostatním částem vinutí nejvíce namáhána.



Obr. 10. Náhradní schéma [8] a) bez příčných kapacit (kapacit závitů vůči zemi)
b) s příčnou kapacitou C_c

Výsledků odvozených pro jednopohovou cívku lze použít i pro vinutí jednofázového vysokonapěťového transformátoru, který má deskové vinutí. Místo závitů se budou za elementy vinutí považovat jednotlivé desky, ze kterých se vinutí skládá. Hodnoty indukčnosti L a kapacit C a K je nutno vztahovat na cívku a jednotku axiální délky vinutí. Kapacita C obsahuje mimo kapacity proti zemi i kapacitu proti vinutí nižšího napětí. Výchozí diferenciální rovnice pak zůstanou shodné za předpokladu, že jde o homogenní vinutí. Ve skutečnosti je však vinutí uspořádáno většinou nehomogenně (odstupňovaná izolace, zesílení vstupních závitů, apod.). Proto namáhání vypočtená pro homogenní uspořádání je nutno považovat za dolní mez, neboť nesouměrnost uvnitř vinutí představuje zvýšení všech namáhání.

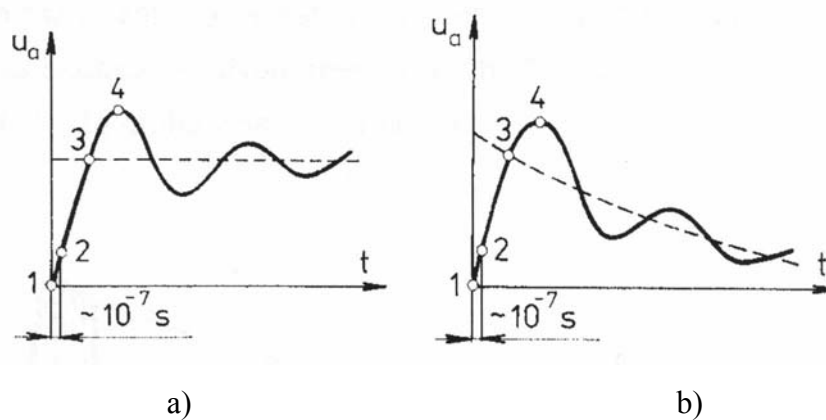
Pro obě zapojení (s uzemněným i s volným koncem) platí, že největší namáhání při jednotkovém rázu je v první čtvrtině cívky, a to max. 140 až 150 %. Typické rozložení maximálního namáhání proti zemi v závislosti na axiální vzdálenosti od svorky pro transformátor s hodnotou $\gamma=10$ je na obr.11



Obr. 11. Rozložení maxim. rázových namáhání proti zemi u transformátorů s $\gamma l = 10$ [8].

Čím větší rozdíl je mezi počátečním a konečným rozložením napětí, tím více se projeví volné kmity při přechodném ději. Je-li doba vlny se strmým čelem konečná (atmosférický impulz), nevzrostou potenciály v různých bodech vinutí k maximální velikosti (na rozdíl od vlny nekonečně dlouhé). Kmity zanikají podle postupně klesajícího napětí na svorkách vinutí, jak je uvedeno na obr. 12.

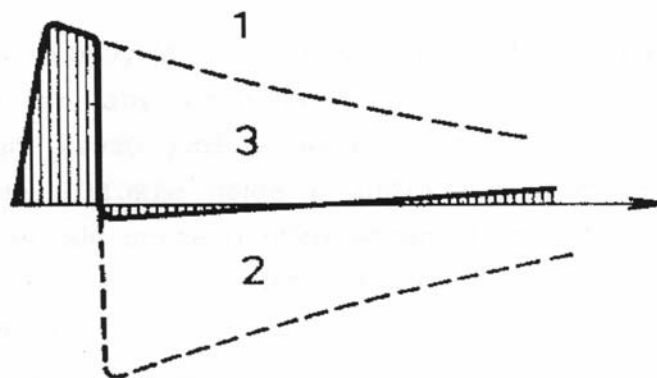
Prakticky je potřeba, aby délka přicházející vlny byla 2 až 3 krát delší, než perioda první harmonické volných kmitů. Při vlnách s dlouhým čelem se kmitající děje projeví podstatně slaběji.



Obr. 12. Změna napětí proti zemi v bodě a při vstupu vlny [8].

a) nekonečně dlouhé pravoúhlé vlny b) se strmým čelem a konečnou délkou

Při volných kmitech mohou vzniknout nebezpečná napětí jak pro izolaci vinutí proti zemi, tak pro mezizávitovou izolaci. Nejvíce namáhána, jak již bylo zmíněno, je izolace prvních závitů a cívek v okamžiku počátečního rozložení napětí nebo při rychlém poklesu napětí v případě kusé vlny. Ta vzniká useknutím atmosférického napěťového rázu např. na jiskřišti. Z hlediska účinků na vinutí lze kusou vlnu považovat za superpozici dvou aperiodických vln opačné polarity jdoucích za sebou za předpokladu, že druhá má strmé čelo, jak je zřejmé z obr.13.



Obr. 13. Vznik kusé vlny (3), křivka (1) je původní vlna a vlna (2) je vlna opačné polarity se strmým čelem [8].

2.4 Výsledky

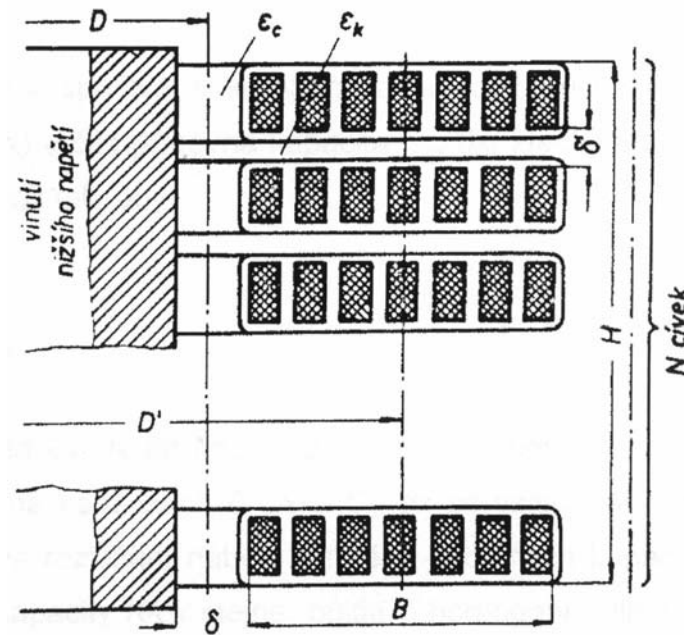
Pro spolehlivý chod transformátoru je třeba jednak zabezpečit, aby na vinutí nebyla přivedena vlna o vyšší hodnotě, než je přípustná mez pro izolaci a jednak je nutno, aby se počáteční rozložení napětí podél vinutí co nejvíce blížilo rozložení konečnému. Tím se omezí nežádoucí účinky jako je přepětí mezi cívkami a závity způsobené volnými kmity při přechodném ději. Aby vinutí vůbec nekmitalo, docílíme lineárním rozložením napětí.

Pro splnění první podmínky se vedení chrání zemičnými lany a celé elektrizační soustavy se vybavují svodiči přepětí, chránící transformátor před vlnami o vyšších napětích, než je elektrická pevnost izolace transformátoru.

Co se týče druhé podmínky, ta je podstatněji obtížnější, vyžaduje daleko složitější konstrukci a technologii výroby vinutí.

2.5 Vliv rozměrů na počáteční rozložení

Počáteční rozložení závisí na parametru γ , ten čím je menší, tím se méně liší počáteční rozložení od lineárního. Následující vzorec udává závislost parametru γ na rozměrech cívkového vinutí dle obr. 14.



Obr. 14. Označení rozměrů cívkového vinutí [8].

$$\gamma = \sqrt{\frac{C}{K}} \cong \sqrt{\frac{\epsilon_c D}{\epsilon_k D} \left(\frac{H N \delta'}{B \delta} \right)} \quad (1.55)$$

Z toho plyne, že vhodnou volbou rozměrů cívkového vinutí lze zmenšit parametr γ a tím zlepšit počáteční rozložení napětí. Např. vinutí široká a nevysoká (o malém poměru H/B) mají výhodná počáteční rozložení.

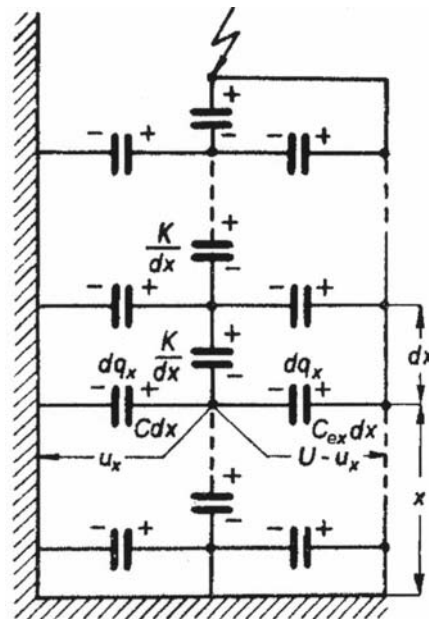
Jelikož však nelze měnit tyto rozměry v širokých mezích, neboť rozhodují o hlavních parametrech, jako jsou napětí naprázdno, nakrátko, chlazení, atd., není možné ovlivňovat počáteční rozložení napětí deskového vinutí v širokých mezích tímto způsobem.

2.6 Stínění

Podstata stínění spočívá v kompenzaci kapacit proti zemi. Přiřadí-li se ke každému závitu (dx) určitá přídavná kapacita $C_{ex}dx$, která se připojí k vývodu vinutí a velikost se zvolí tak, aby

$$\frac{C_{ex}}{C} = \frac{u_x}{U - u_x}, \quad (1.56)$$

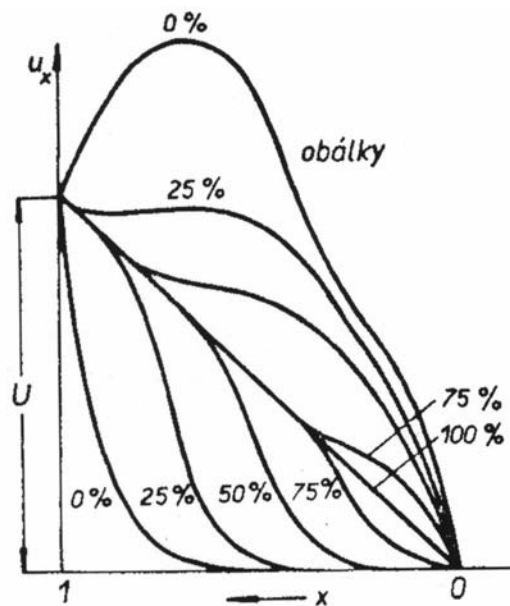
váže kapacita $C_{st}dx$ při napětí $U - u_x$ stejný náboj dq_x jako kapacita Cdx při napětí u_x . Náboje na kapacitách Cdx a $C_{st}dx$ se vzájemně kompenzují a nemají žádný vliv na rozložení nábojů v řetězci podélných kapacit K/dx . Pokud budou všechny podélné kapacity K/dx shodné, půjde o homogenní vinutí a rozložení napětí podél vinutí bude přímkové, což znamená, že parametr γ bude nulový a tím bude odstraněna příčina vlastních kmitů.



Obr. 15. Schéma kompenzace kapacity proti zemi stíněním pro homogenní vinutí [8].

Návrh stínění se však značně komplikuje, půjde-li o nehomogenní vinutí, např. odstupňovaná hlavní i mezizávitová izolace, a je pak zapotřebí složitých výpočtů. Stínění se neprovádí po celé délce vinutí, ale nejčastěji se stíní jen část vinutí u vstupu. Na obr. 16 je

znázorněno počáteční rozložení napětí a obálky volných kmitů pro neúplná stínění, přičemž čísla označují v procentech délku stínění části vinutí.



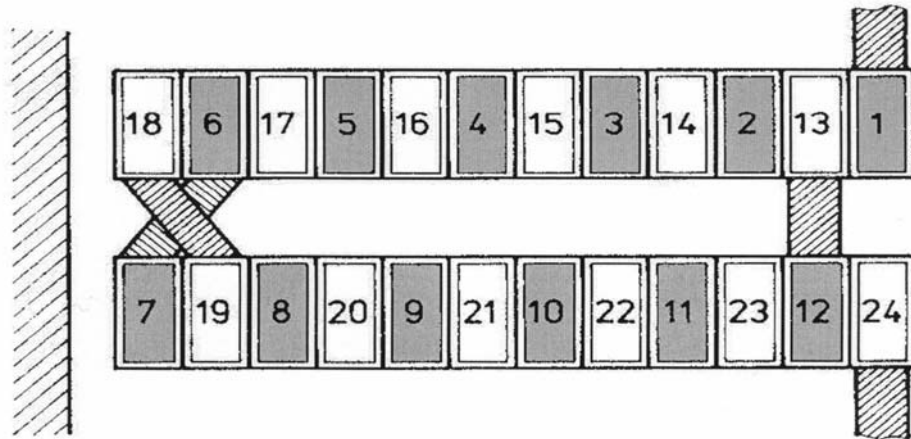
Obr. 16. Počáteční rozložení a obálky volných kmitů u transformát. s neúplným stíněním [8].

Dalším prostředkem pro stínění je použití kapacitních prstenců. Tyto prstence tvoří stínění ve tvaru neuzavřeného mezikruží. Vyrovnávají elektrické pole u konců vinutí, zrovnoměňují průběh počátečního rozložení napětí a tím ho přibližují k průběhu konečnému. Kapacitní prstence se obvykle zhotovují z plastických tvrdých izolačních materiálů (tvrzený papír) s metalizovaným povrchem.

2.7 Prokládaná vinutí

Lineárního průběhu počátečního rozložení napětí podél celého vinutí se dosáhne zvětšováním podélných kapacit. V praxi nepoužívanější způsob je prokládání závitů. Používá se u vinutí složeného z dvoudeskových cívek, které jsou navinuty dvěma paralelními vodiči. Ty jsou pak vzájemně kříženy, jak je patrné z obr. 17.

Dvoudesky mohou být v složitějších případech vinuty z více paralelních vodičů a může být provedeno složitější prostřídání jednotlivých vodičů.



Obr. 17. Prokládané vinutí [8].

Prokládání vodičů může být provedeno ve všech cívkách vinutí nebo se může prokládání provést jen ve vstupních cívkách kde je namáhání mezicívkové izolace i izolace k zemi nejnepříznivější.

Nevýhodou těchto úprav vinutí je to, že při normálních provozních poměrech je mezizávitová izolace mnohem více namáhána, než u běžných způsobů vinutí a také velká pracnost. Přesto však je tato úprava vinutí proti negativním vlivům atmosférického přepětí stále častěji používána a vytlačuje jiné druhy úprav [8].

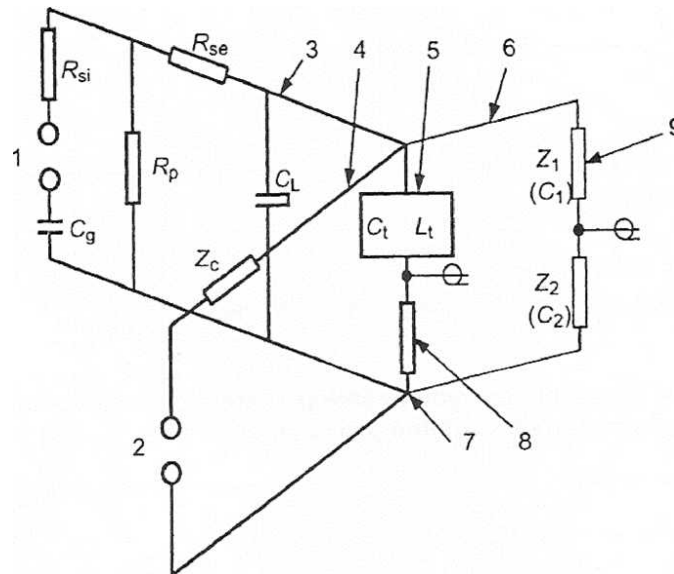
3. Parametry obvodu pro generování atmosférickým impulzů

Pro zkoušení izolace se ve zkušebnách používá rázových generátorů. Rázové generátory se používají zejména pro zkoušení izolace (transformátorů, přístrojů, vedení), pro určení rázových charakteristik, ke zjištění ochranného působení zemnicích lan a pro studium výbojů při vysokém napětí. Generování impulsů je založeno na principu nabití skupiny paralelně zapojených kondenzátorů a jejich následném vybití v sérii. Velikost napětí je dána počátečním nabíjecím napětím, počtem kondenzátorů v sérii při vybití a regulací obvodu. Tvar vlny je určen převážně kapacitami a odpory generátoru a impedancí zátěže.

3.1 Zkušební obvod

Fyzikální uspořádání zkušebního zařízení, zkoušeného objektu a měřicích obvodů může být rozděleno do tří hlavních obvodů:

- *hlavní obvod* zahrnující impulzní generátor, přídavné součásti pro ovlivňování tvaru vlny a zkoušený objekt;
- *obvod pro měření napětí*;
- *obvod pro usekávání impulsů* tam, kde je to požadováno.



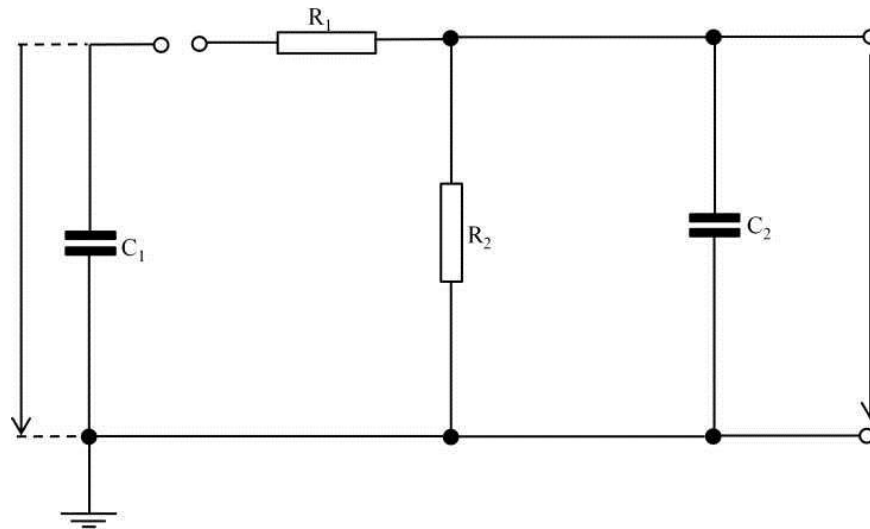
Obr. 18. Základní uspořádání zkušebního obvodu [5].

1 impulzní generátor	C_g	kapacita generátoru
2 usekávací jiskřiště	C_L	zatěžovací kapacita
3 hlavní obvod	C_t	efektivní kapacita zkoušeného objektu
4 usekávací obvod	L_t	efektivní impedance zkoušeného objektu
5 zkoušený objekt	R_{si}	vnitřní sériový odpor
6 měřící obvod napětí	R_{se}	vnější sériový odpor
7 referenční zem	R_p	paralelní odpor
8 proudový bočník	Z_c	přídavná impedance usekávacího obvodu
9 dělič napětí	$Z_1(C_1)$	impedance (kapacita) vn části děliče napětí
	$Z_2(C_2)$	impedance (kapacita) nn části děliče napětí

Tvar impulsu je ovlivněn těmito parametry:

- efektivní kapacitou a indukčností zkoušeného objektu
- kapacitou generátoru
- děličem napětí
- rozptylovou indukčností a kapacitou generátoru a celého zkušebního obvodu
- usekávacím zařízením, je-li použito

3.2 Hlavní obvod



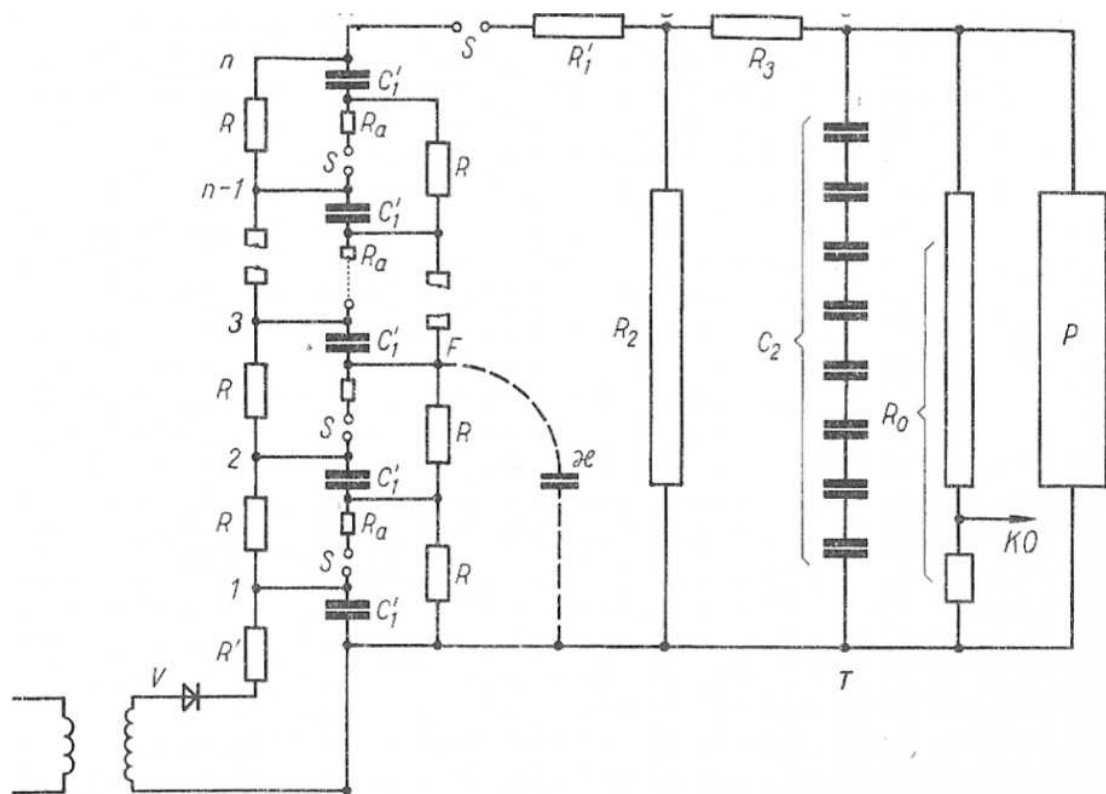
Obr. 19. Schéma jednostupňového rázového generátoru napětí [5].

Na obr. 19 je uvedeno schéma jednostupňového rázového generátoru napětí, kde:

- C_1 značí tzv. činnou kapacitu,
- C_2 zatěžovací kapacitu,
- R_1 čelní odpor a
- R_2 týlní odpor.

Činná kapacita se nabije ze stejnosměrného zdroje C_1 , přičemž se vybije přes jiskřiště do obvodu R_1 , C_2 , R_2 . Průběh týlu rázové vlny je dán napětím, které vytvoří vybíjecí proud činné kapacity na týlním odporu. Tvar čela vlny je řízen zatěžovací kapacitou a čelním odporem, přes který se tato kapacita nabíjí.

Použití jednostupňového generátoru je omezeno velikostí napětí nabíjecího zdroje. Pro značně vysoká napětí se používá několikastupňového uspořádání, jeho běžné schéma je zobrazeno na obr. 20. Obsahuje sérii kondenzátorů, z nichž každý má kapacitu C_1 a které se nabíjejí paralelně napětím U přes rezistory R , jejichž odpory jsou značné vzhledem k odporům R_1 , R_2 , R_3 . Když se všechny kondenzátory nabily, zapojí se řídicími jiskřišti S do série.



Obr. 20. Schéma generátoru napětí v Marxově řazení [2].

Tím se jejich napětí sečtou a kondenzátory se vybíjejí přes tlumící odpory R_a do obvodu ABCT. Po krátkou dobu rázu můžeme sériové řazení považovat za jedinou výslednou činnou kapacitu s hodnotou $C'_1/n = C_1$. Vyznačené několikasupňové uspořádání je známo jako *Marxovo řazení*. Napětí jednoho stupně je dáno volbou nabíjecího zařízení, které se složeno ze tří rezistorů R_1 , R_2 a R_3 , jejichž odpory se upraví tak, abychom dostali na svorkách zkoušeného objektu (tj. mezi body C a T) žádaný tvar rázové vlny pro danou hodnotu zatěžovací kapacity C_2 . Nabíjecí rezistory R obecně nemají znatelný vliv na tvar rázové vlny [2].

3.3 Obvod pro měření

Jako obvod pro měření může být použit dělič napětí. Velmi krátce trvající přechodové děje, jako atmosférická přepětí nebo napětí vyráběna rázovými generátory, se sledují a zaznamenávají pomocí osciloskopu. Dříve se tyto záznamy získávaly jen z analogových osciloskopů, dnes již máme k dispozici i digitální osciloskopy. Osciloskopy bývají

konstruovány tak, že na ně můžeme připojit napětí o hodnotě jednotek kV. Proto se snímané napětí redukuje děličem napětí. V dnešní době jsou na trhu i vysokonapěťové sondy, které se dají připojit na napětí až stovek kV.

3.4 Tvary vln

Hodnoty předepsaných tvarů impulzů nemusí být vždy dosažitelné. Při impulzních zkouškách prováděných na velkých výkonových transformátorech a tlumivkách s nízkou indukčností vinutí nebo vysokou rázovou kapacitou mohou být akceptovány větší tolerance.

Rázová kapacita transformátoru je při zkoušce konstantní, sériové odpory mohou být sníženy za účelem získání požadované doby čela nebo rychlosti nárůstu, ale jejich snížení by nemělo být takové, aby došlo k nadměrnému zvýšení oscilací ve vrcholu napěťové vlny. Jestliže je žádoucí mít krátkou dobu čela, pak mohou být akceptovány parametry respektující normu ČSN EN 60060-1: Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky.

V případech velkých výkonových vinutí a obzvláště v případech vinutí středního a nižšího napětí nemusí být dosažitelná skutečná doba půltýlu T_2 v rámci tolerovaných hodnot. Indukčnost takovýchto vinutí může být tak nízká, že výsledná vlna má oscilační průběh. Tento problém může být do jisté míry vyřešen použitím velké kapacity generátoru, paralelním provozem stupňů generátoru, přizpůsobením sériových odporů nebo specifickým zkušebním zapojením nezkoušených vývodů vinutí nebo navíc nezkoušených vývodů zkoušených vinutí.

Uzemnění přes impedanci namísto přímého uzemnění nezkoušených fázových svorek má za následek výrazné zvýšení efektivní indukčnosti. V případě přímo uzemněných svorek se uvažuje pouze rozptylová indukčnost (stanovená impedancí nakrátko). V případě svorek uzemněných přes impedanci se uplatňuje jako převažující hlavní indukčnost. To může způsobit, že efektivní indukčnost je 100 až 200 krát větší než v případě s přímo uzemněnými svorkami [5].

3.5 Princip ovlivňování tvaru vlny

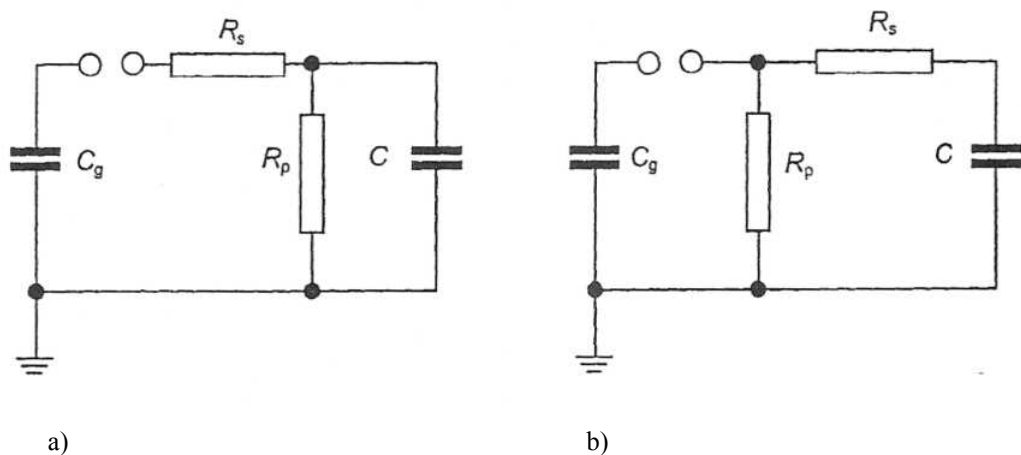
Generování impulzů je založeno na principu nabití skupiny paralelně zapojených kondenzátorů a jejich následném vybití v sérii. Velikost napětí je určena počátečním

nabíjecím napětím, počtem kondenzátorů v sérii při vybití a regulací obvodu. Tvar vlny je určen převážně kapacitami a odpory generátoru a impedancí zátěže.

Zásady pro ovlivňování tvaru vlny při zkouškách transformátorů atmosférických impulzem jsou ukázány na zjednodušených schématech uvedených na obrázcích 21a) a b). Tato schémata je nutné rozdělit do dvou hlavních skupin:

- pro vysokoimpedanční vinutí;
- pro nízkoimpedanční vinutí.

3.5.1 Vysokoimpedanční vinutí ($L_t > 100 \text{ mH}$)



Obr. 21. Parametry ovlivňující tvar vlny u vysokoimpedančních vinutí [5].

kde C_g kapacita generátoru

$$C = C_t + C_L + C_1$$

$$R_s = R_{si} + R_{se} \text{ celkový sériový odpor} \quad (1.57)$$

R_p paralelní odpor

Doba čela bude dána:

$$a) \quad T_1 \approx 3 \times \frac{R_s R_p}{R_s + R_p} \times \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (1.58)$$

$$b) \quad T_1 \approx 3 \times R_s \times \frac{C_g C}{C_g + C} \quad (1.59)$$

Doba půltýlu pak bude dána:

$$a) \quad T_2 \approx 0,7(R_s + R_p)(C_g + C) \quad (1.60)$$

$$b) \quad T_2 \approx 0,7R_p(C_g + C) \quad (1.61)$$

Obecně jsou parametry čela a týlu upravovány v souladu s principy použitelnými pro čistě kapacitní zátěže. Mělo by být zdůrazněno, že efektivní kapacita transformátoru C_t zapracována v hodnotě C , představuje z pohledu čela a týlu rozdílnou fyzikální veličinou. V případě doby čela může být hodnota doby čela C_t vypočtena jako

$$C_t \approx C_B + \sqrt{C_s C_e} \quad (1.62)$$

kde C_B představuje kapacitu průchodky,

C_s je sériová kapacita vinutí a

C_e je kapacita vinutí proti zemi.

V případě týlu vlny může být C_t odhadnuta jako C_b plus část C_e v závislosti na počátečním rozložení napětí.

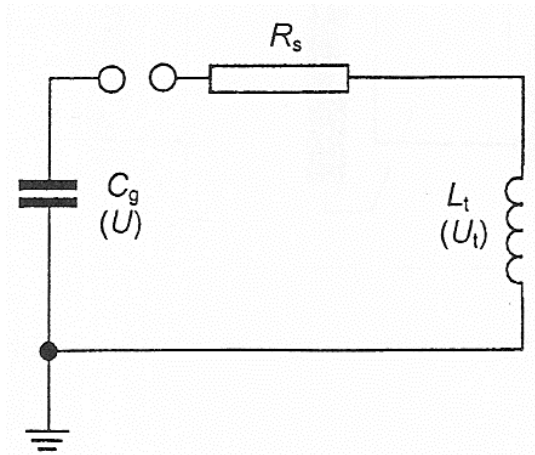
U vinutí s efektivní indukčností L_t v rozsahu 20 mH až 100 mH impedance výrazně snižuje časovou konstantu vybití $\tau = R_p C_G$. V takových případech musí být hodnota R_p zvýšena na hodnotu dvakrát až desetkrát, než je hodnota vypočtená z rovnice 1.63.

$$T_1 \approx 3R_s \times C; \quad T_2 \approx 0,7R_p \times C_g \quad (1.63)$$

3.5.2 Nízkokoimpedanční vinutí ($L_t < 100$ mH)

Pro nastavení čela platí úplně stejné vztahy jako u vysokoimpedančního vinutí.

Pro účely nastavení týlu může být zkoušený objekt reprezentován indukčností, jak je uvedeno na obr. 22.



Obr. 22. Parametry ovlivňující tvar vlny u nízkoimpedančního vinutí [5].

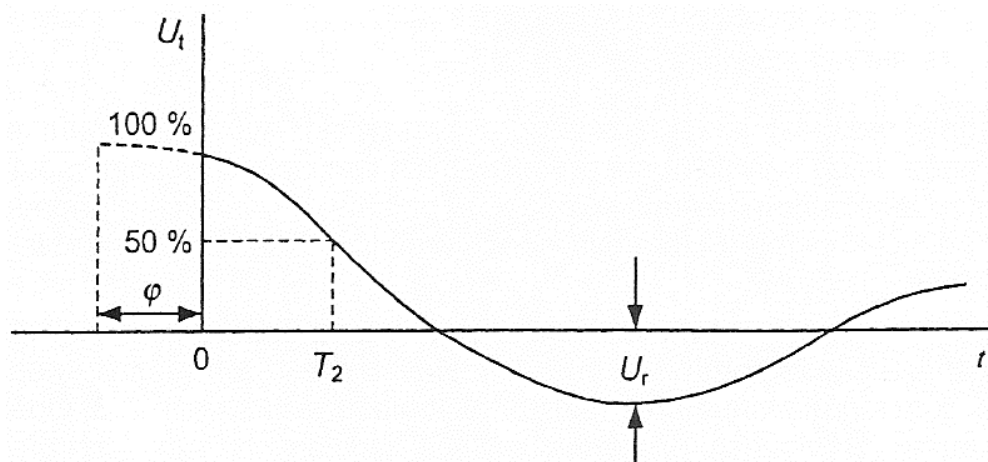
Zkušební napětí U_t bude mít exponenciální nebo oscilační charakter v závislosti na hodnotě koeficientu útlumu k obvodu. Kriticky ($k=1$) nebo nadkriticky ($k>1$) tlumené obvody vykazují exponenciální křivky. Takovéto obvody nejsou běžně používány, protože tyto hodnoty odporů způsobují příliš dlouhé doby čela.

V případě, že $k < 1$, je zkušební napětí dáno vztahem:

$$U_t = Ue^{\alpha t} \left(\cos \omega t - \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) = \frac{U}{\cos \varphi} e^{\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.64)$$

$$\text{kde } \omega^2 = \omega_0^2 - \alpha^2, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{L_t C_g}, \quad \alpha = \frac{R_s}{2L_t}, \quad \text{tg } \alpha = \frac{\alpha}{2L_t} \quad (1.65)$$

$$\text{a koeficient útlumu } k = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{R_s}{2\sqrt{\frac{L_t}{C_g}}} \quad (1.66)$$



Obr. 23. Tlumená oscilace [5].

Pro první odhad T_2 se R_s uvažováno rovno nule. Pak má rovnice 1.64 tvar: $U_t = U \cos \omega t$ a doba půltýlu je určena vztahem

$$T_2 = \frac{1}{6} \times \frac{2\pi}{3} \sqrt{L_t C_g} \quad (1.67)$$

Tento teoretický vztah definuje netlumenou oscilační vlnu se 100 % vrcholovou hodnotou opačné polaroty.

Oscilace s takto vysokou hodnotu a s opačnou polaritou, může přetěžovat izolaci mezi cívkami nebo mezi závitů, které může vyvolat vznik částečných výbojů a zvýšené elektrodové mechanismy způsobené zkušebními nedostatky. Vrcholová hodnota opačné polaroty U_r by měla být z tohoto důvodu omezena na 50 % počáteční vrcholové hodnoty.

Při omezení vrcholové hodnoty opačné polaroty na polovinu musí být použit značný stupeň útlumu, to bude důsledkem kratší doba půltýlu; v takovém případě bude koeficient $k=0,25$ a doba půltýlu bude

$$T_2 = \sqrt{0,5 L_t C_g} \quad (1.68)$$

Hodnota L_t je ovlivněna zapojením nezkoušených vinutí. Se zkratovanými a uzemněnými nezkoušenými vinutími představuje hodnota L_t rozptylovou indukčnost transformátoru.

Zkoušení v tomto případě představuje pro izolaci mezi vinutími nebo částmi vinutí největší namáhání i v případech s výsledným kratším týlem.

Vlastní indukčnost může být zvětšena zatěžovacím odporem nezkoušeného vinutí.

Hodnota C_g se může měnit sériovým nebo paralelním zapojením stupňů impulzního generátoru v souladu s rovnicí

$$C_t \approx 2 \frac{T_2^2}{L_t} \quad (1.69)$$

V případě extrémně nízkých hodnot L_t nebo když hodnota L_t nemůže být zvýšena pomocí odporového propojení svorek nezkoušených vinutí proti zemi, je časová konstanta vybití dána vztahem

$$\tau = \frac{L_t}{R_s} \quad (1.70)$$

Rovnice 1.70 ukazuje na další možnost, jak je možné upravit tyl vlny. Při velkém snížení R_s se projeví výrazným překmitem nebo dojde k výskytu superponovaných oscilací ve vrcholu impulsu a také výraznou amplitudou překmitu do opačné polarity. V takovýchto případech se doporučuje připojit přídavnou zatěžovací kapacitu C_L pro ovlivnění tvaru vlny. Zatěžovací kapacita omezuje nepříznivé účinky malých sériových rezistorů R_s .

Protože výše uvedené metody pro ovlivňování vlny nejsou stále dostačující pro dosažení požadované doby půltýlu, je nezbytné zvolit kompromis a buď přijmout kratší dobu půltýlu nebo zvolit uzemnění nezkoušených svorek zkoušeného vinutí přes rezistor [5].

3.6 Kalibrace

Před zahájením samotné zkoušky by měla být provedena celková kontrola zkušební obvodu a měřicího obvodu a měřicího systému při napětí nižším než je snížená hladina napětí. Během této kontroly může být napětí měřeno prostřednictvím *kulového jiskřiště* nebo na základě srovnávacího měření porovnáním s jiným ověřeným přístrojem. V případě použití kulového jiskřiště by mělo být vzato v úvahu, že jde pouze o kontrolu a ne o nahrazení periodicky prováděné kalibrace ověřovaného měřicího systému. Po provedení všech kontrol je nezbytné, aby ani měřicí ani zkušební obvod nebyl měněn s výjimkou odstranění přístrojů

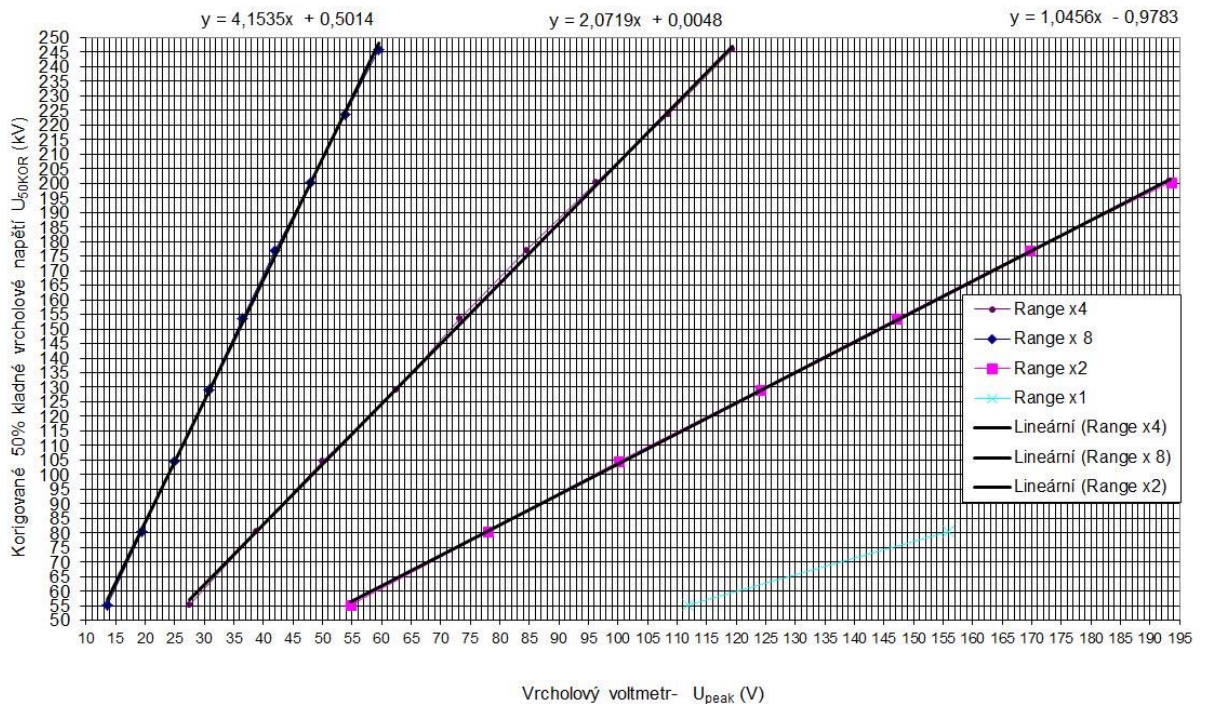
použitých v kontrole. V tab.5 jsou uvedena kalibrační data, která jsem získal měřením v laboratoři VN a na obr. 24 je výsledná kalibrační křivka.

d _{50%} (cm)	Nastavený doskok uvažující korekci: 2 mm (mm)	4. etapa impuls generátor - 500 mm sférické elektrody - jedna elektroda uzemněna NEW DIVIDER 1/1000 and PEAK VOLTMETER TYPE 64						Opraveny 50% hodnoty pozitiv vrchol tabulky z vybíjecího napětí			
		Jedna fáze nabíjecí napětí U (V)	Vrcholový voltmetr U _{PV} (V)				T (°C)	p (kPa)	U _{50TAB} (kV)	correction factor k _H	U _{50KOR} (kV)
			x1	x2	x4	x8					
2	18	15	111,8	54,7	27,6	13,6	24,2	96,19	59	0,94	55,2
3	28	21	155,9	78,0	38,9	19,4	24,2	96,19	86	0,94	80,4
4	38	27,8		100,1	50,0	24,9	24,2	96,19	112	0,94	104,8
5	48	34,5		124,0	62,4	30,9	24,2	96,19	138	0,94	129,1
6	58	41,4		147,2	73,3	36,4	24,2	96,19	164	0,94	153,4
7	68	49		169,6	84,5	42	24,2	96,19	189	0,94	176,8
8	78	55,5		193,5	96,3	48	24,2	96,19	214	0,94	200,2
9	88	63,4			108,6	53,8	24,2	96,19	239	0,94	223,6
10	98	71			119,3	59,6	24,2	96,19	263	0,94	246,0

Tab. 5. Kalibrační tabulka

Kalibrace byla provedena pomocí rázového generátoru vlny 1,2/50, napětí bylo měřeno vrcholových voltmetrem připojeným na dělič s poměrem 533:1

Kalibrační křivka - 4. etapa impulsní generátor a PEAK VOLTMETR TYP 64 - Rozsah x4



Obr. 24. Výsledná kalibrační křivka

4. Zkušební postupy u zkoušky atmosférickým impulzem

4.1 Zkušební metody

4.1.1 Obecné požadavky

Obecné definice výrazů vztahující se ke zkouškám impulzem, požadavky na zkušební obvody, provedení zkoušek a periodické kontroly schválených měřících přístrojů je možno nalézt v ČSN EN 60060-1: Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky.

Zkoušky atmosférickým impulzem (LI) provádíme pouze na vinutích, které mají konec vinutí vyveden nádobou transformátoru nebo víkem.

Pro olejové transformátory má normálně impulz zápornou polaritu, sníží se tím riziko náhodných vnějších přeskoků ve zkušebním obvodu.

Ochranné jiskřiště na průchodkách musí být odstraněno nebo jejich doskok zvětšen, aby se zabránilo přeskokům během zkoušky.

Zkušební impulz musí být normalizovaný atmosférický impulz $1,2 \mu\text{s} \pm 30 \%$ / $50 \mu\text{s} \pm 20 \%$.

Sled přikládání impulzů musí být tento: jeden impulz mezi 50 % a 70 % plného zkušebního napětí a tři po sobě jdoucí impulzy plného napětí. Jestliže při některém z těchto impulzů nastane vnější přeskok v obvodu nebo jiskřišti průchodky nebo selže jeden z předepsaných měřících kanálů, musí být tento impulz vynechán a přiložen impulz nový.

Nelineární ochranné přístroje zapojené podél vinutí mohou svými vlastnostmi způsobit rozdíly mezi oscilogramy při snížené a plné vlně impulzu; aby se prokázalo, že tyto rozdíly jsou způsobeny působením těchto přístrojů, musí se provádět zkoušky dvěma nebo více impulzy se sníženou plnou vlnou při různé velikosti napětí. Aby se prokázala vratnost nelineárních změn, musí následovat stejné snížené plné impulzy po zkoušce plnou vlnou v obráceném pořadí. Příklad: 60 %, 80 %, 100 %, 80 %, 60 %.

4.1.2 Pořadí zkoušek

Postupujeme takto: přiložíme jeden impuls mezi 50-70 % plného zkušebního napětí a tři po sobě jdoucí impulsy plného napětí. Jestliže při některém z těchto impulsů nastane vnější přeskok v obvodu nebo na jiskřišti průchodky nebo selže jeden z předepsaných měřících kanálů, musí být tento impuls vynechán a přiložen nový.

4.1.3 Zkoušky impulzem na fázových svorkách

Sled zkušebních impulsů postupně přikládáme na každou fázovou svorku.

U trojfázového transformátoru je třeba ostatní fázové svorky uzemnit přímo nebo přes malou impedanci, nepřevyšující impedanci připojeného vedení.

Má-li transformátor svorku N, střed uzemníme přímo nebo přes malou impedanci jako na měřící proudový bočník a nádobu též uzemníme. Když bychom měřili transformátory s odděleným vinutím, jsou svorky nezkoušeného vinutí rovněž uzemněny přímo nebo přes impedanci tak, že za všech okolností je napětí vznikající na svorkách omezeno na 75 % jmenovitého výdržného napětí při atmosférickém impulsu u vinutí zapojených do hvězdy a na 50% u vinutí zapojených do trojúhelníku.

V případě zkoušek fázových svorek společné části vinutí, s uzemněnými fázovými svorkami vyššího napětí se může stát, že nelze dosáhnout obvyklými prostředky normalizovaného tvaru impulsu. Pak se připouští uzemnit nezkoušené fázové svorky pomocí rezistorů do 400 Ω . Kromě toho by nemělo napětí k zemi vznikající na nezkoušených fázových svorkách překročit 75 % jejich jmenovitého výdržného napětí při atmosférickém impulsu na vinutích zapojených do hvězdy a 50 % na vinutích zapojených do trojúhelníku.

Při zkouškách vinutí s malou impedancí může být nesnadné dosáhnout správného tvaru impulsu na zkoušených svorkách. V tomto případě se musí připustit širší tolerance. Je také možné zjednodušit problém uzemněním nezkoušených svorek zkoušené fáze přes

rezistory. Hodnota rezistoru se musí volit tak, aby napětí vznikající na svorkách bylo opět omezeno do 75 % jejich jmenovitého výdržného napětí při atmosférickém impulsu na vinutích zapojených do hvězdy a 50 % na vinutích zapojených do trojúhelníku.

4.1.4 Zkoušky impulzem svorky N

- **Nepřímým způsobem**

Zkušební impulzy přikládáme na kteroukoli z fázových svorek nebo ke všem třem fázovým svorkám třífázového vinutí spojeným navzájem. Svorku N připojíme k zemi přes impedanci nebo ponecháme otevřenou, přičemž amplituda napětí vznikající na této impedanci při přiloženém normalizovaného atmosférického impulzu na fázovou svorku, musí být rovno jmenovitému výdržnému napětí svorky N. Tvar ani amplituda impulzu není předepsána, protože ten je dán parametry transformátoru, nesmí ale dosáhnout 75 % jmenovitého výdržného napětí atmosférického impulzu.

- **Přímým způsobem**

Zde přivádíme zkušební impulzy, které odpovídají jmenovitému výdržnému napětí, na střed a všechny fázové svorky jsou uzemněny. V tomto případě se připouští delší délka čela, až 13 μ s.

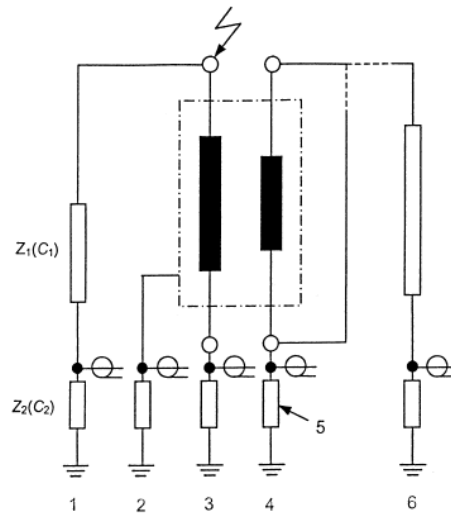
4.1.5 Metoda přepětí přeneseného na vinutí nižšího napětí

Jestliže vinutí nižšího napětí nemůže být v provozu namáháno atmosférickým přepětím ze sítě nižšího napětí, můžeme toto vinutí zkoušet impulzy přepětí přenesenými z vinutí vyšší strany.

Tato metoda je také odůvodnitelná tehdy, je-li konstrukce taková, že impulz přiložený přímo na vinutí nižšího napětí může způsobit nereálné namáhání vinutí vyšších napětí, zvláště pak když je velké odbočkové vinutí fyzicky přilehlé k vinutí nižšího napětí.

Tuto zkoušku provádíme přivedením impulzů na přilehlé vinutí vyššího napětí. Fázové svorky vinutí nižšího napětí připojíme k zemi přes rezistory takové hodnoty, že amplituda přeneseného impulzního napětí mezi svorkami a zemí je co možná nejvyšší, nepřevyšuje však jmenovité impulsní výdržné napětí. Velikost přiložených impulzů nesmí dosáhnout impulzní hladinu vinutí, ke kterému jsou impulzy přikládány.

4.1.6 Zapojení při zkoušce



Legenda

- 1 měřicí obvod napětí
 - 2 proud tekoucí nádobou
 - 3 proud tekoucí svorkou N nebo vinutím
 - 4 kapacitně přenesený proud
 - 5 proudové bočníky
 - 6 měřicí obvod napětí a přenesené napětí
- $Z_1(C_1)$, $Z_2(C_2)$ impedance (kapacity) děliče napětí (viz také obrázek 1)

Obr. 25. Zapojení fázových svorek [5].



Obr. 26. Příklad zapojení zkoušeného výkonového transformátoru.

Oscilografické a digitální záznamy získané při kalibracích a zkouškách musí jasně prokazovat tvar impulzu přikládaného napětí (dobu čela, půltýlu a amplitudu). Nepřítomnost významných rozdílů při sníženém a plném zkušebním napětí prokazuje, že izolace zkoušku vydržela. Jestliže nastanou mezi výslednými oscilogramy odchylky, musí se přiložit další tři impulzy plného napětí nebo se musí zkoušená svorka znovu podrobit celé zkoušce. Zkouška se považuje za úspěšnou, nejsou-li pozorovány žádné další odchylky [4].

4.2 Měřicí a záznamová technika

4.2.1 Analogové a digitální záznamové systémy

Požadavky na analogové a číslicové zapisovače jsou uvedeny v ČSN EN 61083-1 ed. 2 (Přístroje a programové vybavení pro měření při zkouškách impulzu vysokého napětí - Část 1 Požadavky na přístroje). Digitální forma záznamu nám umožňuje matematickou interpretaci výsledků a využití dodatečného matematického zpracování, například pro analýzu poruch. Průběžné hodnoty získané digitálním měřením by neměly být podrobeny matematickému zpracování, filtraci nebo vyhlazení.

V případě, že jsou digitální osciloskopy použity jako jednoduché měřicí zařízení k přímému měření průběhu napětí, bez záměru provádět matematické zpracování, musí být pokládány za technicky dokonalé analogové přístroje. Při zkouškách je nutné současně měřit:

- přiložené napětí
- alespoň jeden průběh přechodných dějů (z tohoto důvodu je nutné mít alespoň dva nezávislé kanály pro záznam)

Zatímco přiložené napětí je definováno, výběr ostatních veličin je určen výběrem metody pro detekci poruch [7].

4.2.2 Analogový záznam průběhu

Základem při vyhodnocení výsledků zkoušky je srovnávání záznamů při stejné amplitudě použitím vhodných děličů umístěných v osciloskopech.

- Záznam průběhu impulzu napětí: tvar impulzu napětí - časový rozklad pořízených záznamů za účelem stanovení tvaru vlny během předběžného nastavení parametrů zkušebního

obvodu je zvolen $\leq 10 \mu\text{s}$ pro záznam čela vlny. Záznam týlu vlny umožňuje vyhodnotit dobu půltýlu, popř. amplitudu opačné polarity.

4.2.3 Digitální záznam průběhu

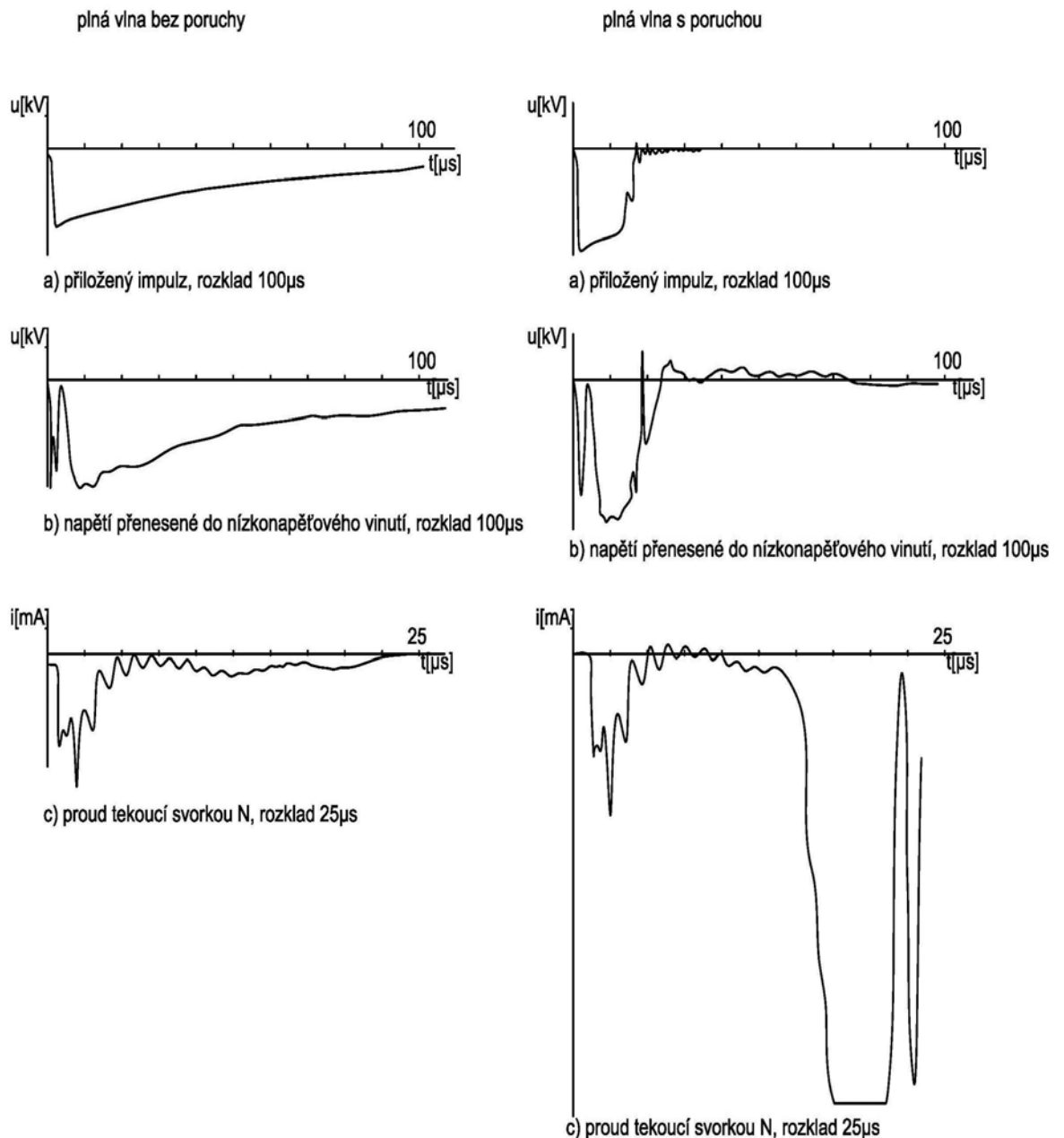
Princip pořizování digitálního záznamu je založen na měření napětí nebo proudu pomocí vzorkování v pravidelných časových intervalech. Tyto vzorky by měli představovat nezpracovaná data určená pro vyhodnocení parametrů tvaru vlny a také pro analýzu výsledků zkoušek založené na srovnávání záznamů pořízených při impulzech při plné a snížené hladině napětí. Dodatečně mohou být zaznamenaná data zpracována pomocí algoritmů pro analýzu vlny, např. metodou *analýzy poruch* z pořízených záznamů. Během impulzních zkoušek se v okolí zkušebního uspořádání vytváří intenzivní elektromagnetické pole. Je proto nutné chránit proti nim citlivá zařízení v digitálních záznamových systémech, celé zařízení pro zpracování signálu, vč. napájecího zdroje. Obrazovka zapisovače by měla mít rozlišení $\geq 768 \times 1024$ bodů a tiskárna by měla mít ≥ 300 bodů na palec.

Záznam průběhu impulsu napětí: tvar impulsu napětí - doba záznamu pro stanovení tvaru vlny musí být nastavena na $\leq 10 \mu\text{s}$. Záznam týlu vlny by měl umožňovat vyhodnocení doby půltýlu popřípadě nutnosti, vyhodnocení amplitudy i opačné polarity. Dle normy ČSN EN 61083-1 je stanoven 9bitový zapisovač 60 MHz s minimální rozlišovací schopností pro záznam průběhů impulsů napětí a proudu. Při použití časové lupy na časový úsek $10 \mu\text{s}$ nebo kratší pro účely vyhodnocení čela vlny nebo vyhodnocení useknutých impulsů by mělo být zváženo použití 10bitového zapisovače se vzorkovacím kmitočtem 100 MHz.

Pro provedení analýzy tvaru vlny provádíme vzorkování přes celý tvar vlny až do jejího úplného ztlumení. Je nutno nastavit digitální zapisovač tak, aby byl k dispozici dostatečný počet bodů pro stanovení skutečného začátku průběhu vlny. Při vysokonapěťových zkouškách výkonových transformátorů se nejvíce zaměřujeme na vyhodnocení amplitudy a časových parametrů u nestandardních tvarů vln; zejména u výsledků s unipolárními překmity o kmitočtech menších jak 0,5 MHz. V takových případech byly zjištěny chyby převyšující 10 %, jejichž příčinou byly v číslicových zapisovačích vestavěné algoritmy pro vyhlazování křivky. Proto je nutné provést důkladné vyhodnocení křivek z nezpracovaných dat. Zároveň provádíme paralelní měření vrcholovým voltmetrem. K dalšímu zkreslení může docházet při

překmitu do opačné polaroty, při kterém může dojít k oříznutí záznamové vlny z důvodu přesycení vstupních zesilovačů digitálního osciloskopu ve zvoleném rozsahu [7].

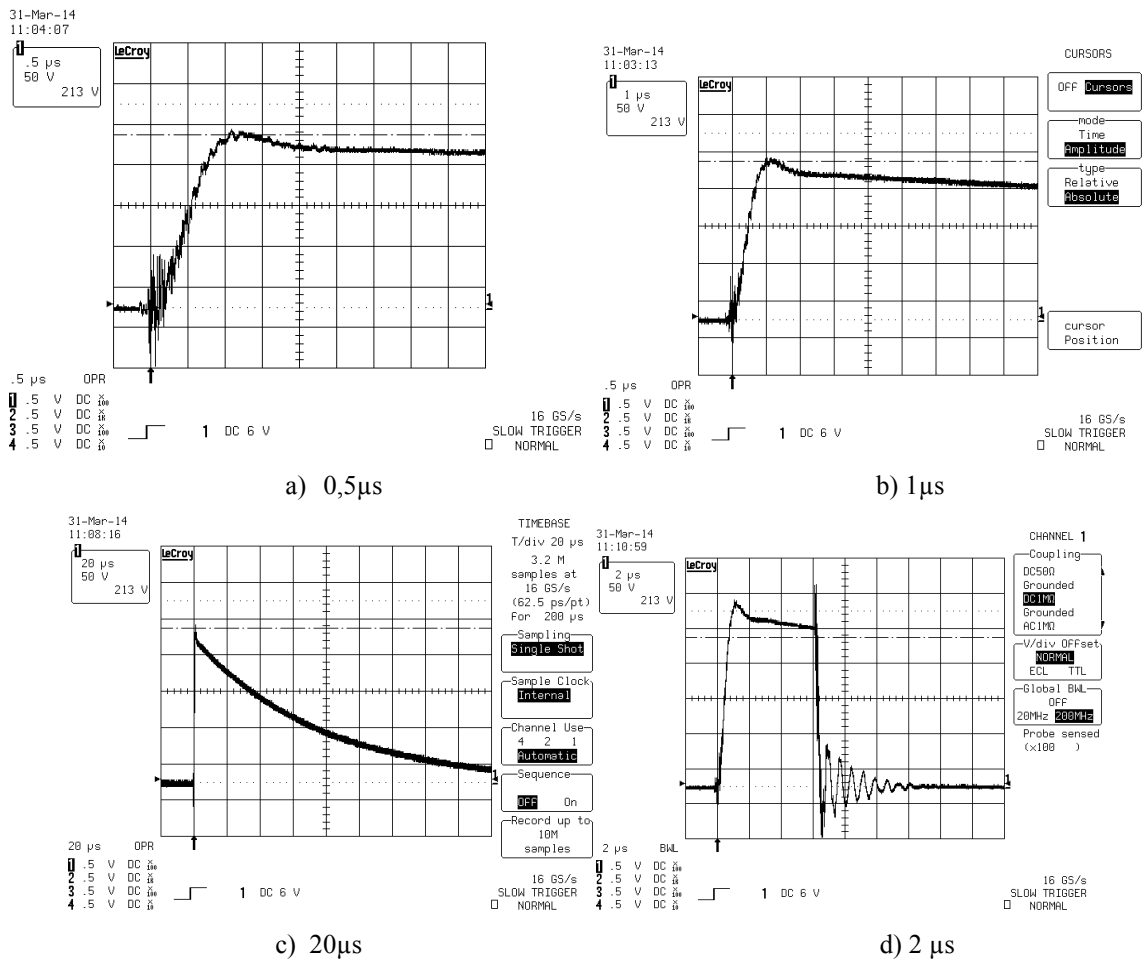
Na obr. 27 je uveden oscilogram atmosférického impulzu, kde je patrný vliv časového rozlišení - rozklad 25 μs a 100 μs a kde je znázorněn záznam přenesených napětí, který umožňuje odhalit poruchy s vyšší citlivosti, než v případě měření přiloženého napětí.



Obr. 27. Atmosférický impulz při zkoušce plnou vlnou [5].

4.3 Nastavení parametrů osciloskopu

Při nesprávném nastavení osciloskopu může dojít k nesprávnému vyhodnocení měření. Na následujících obrázcích je znázorněna chyba zavedená chybným nastavením frekvenčního pásma, chybným nastavením vzorkovací frekvence a chyba způsobená vyhlazovacím algoritmem. Vliv těchto parametrů jsem si ověřil v laboratoři VN na digitálním osciloskopu LeCroy 950.

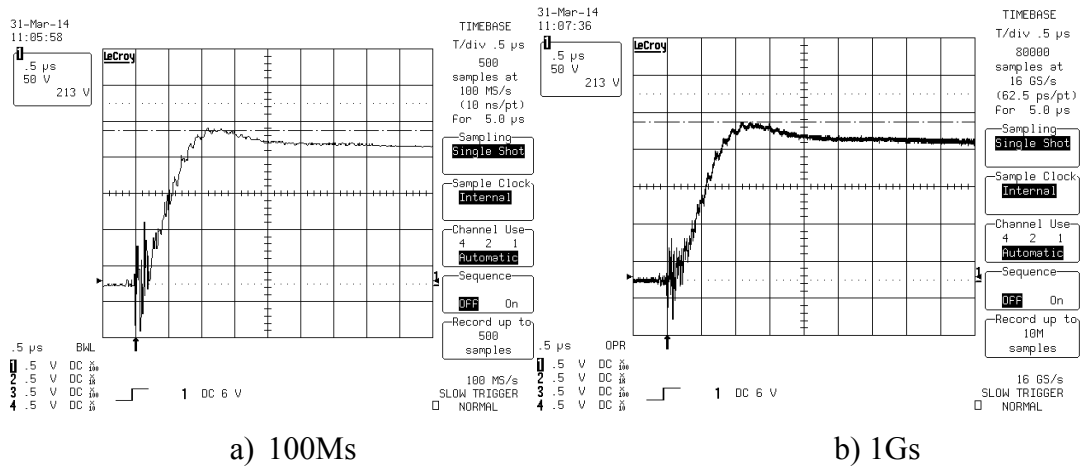


Obr. 28. Vliv nastavení frekvenčního pásma

Požadovaná doba čela je určena sériovými odpory generátoru, které musejí být zvoleny tak, aby nedošlo k nadměrnému zvýšení oscilací ve vrcholu napěťové vlny, akceptovány jsou překmity ne větší než $\pm 5\%$, obr.28 a), b).

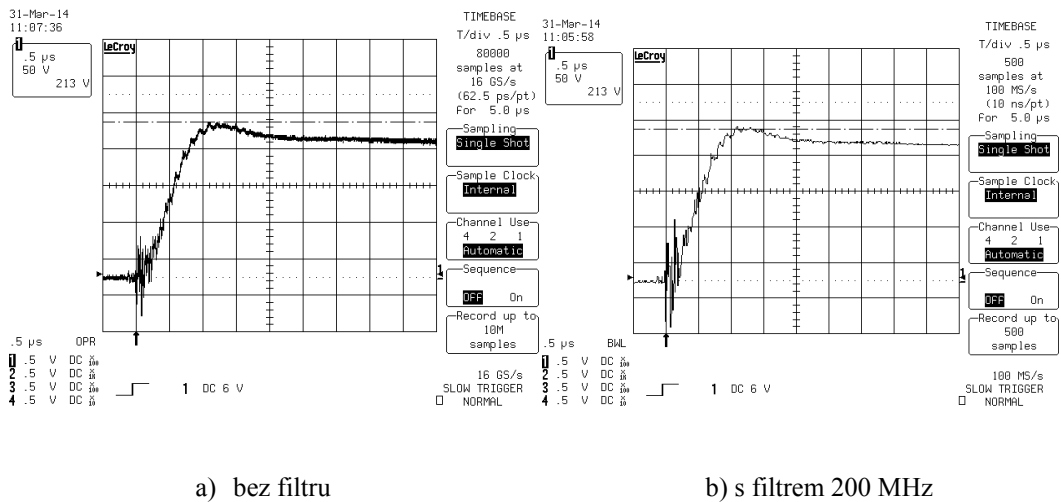
Vzorkování provádíme přes celý tvar vlny až do jejího úplného ztlumení – obr.28 c).

Na obr.28 d), který zaznamenal průběh vlny se simulovanou poruchou – přeskokem, je zaznamenán chybný překmit napětí, který je vyšší, než ve skutečnosti.



Obr. 29. Vliv nastavení vzorkovací frekvence

Na obrázku 29 a) je výrazně menší počet navzorkovaných hodnot, rizikem takto získaných dat je, že poruchové hodnoty nemusí být vůbec naznamenaný.



Obr. 30. Vliv vyhlazovacích algoritmů

Na obr. 30b) je patrný vliv filtru, který zaokrouhluje naměřená data a tím výrazně zpřesňuje výsledný tvar vlny.

4.4 Metody vhodné pro detekci poruch

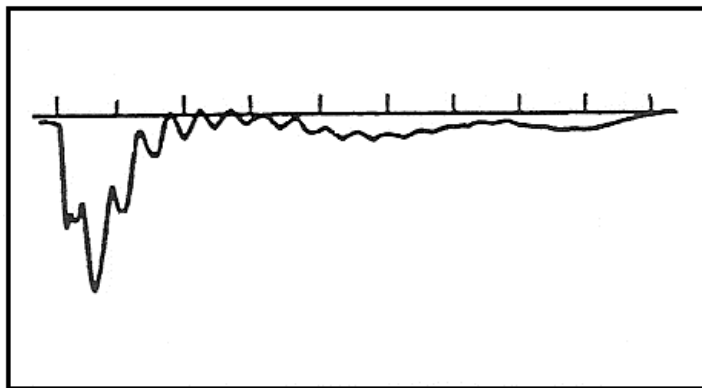
4.4.1 Srovnávací metoda

Detekce poruch provádíme vyhodnocením oscilografických záznamů nebo nezpracovaných dat digitálních záznamů přiloženého zkušebního napětí a impulzní proudové odezvy.

Při zkouškách zaznamenáváme ještě alespoň jeden z následujících průběhů:

- a) proud tekoucí svorkou N (pro vinutí zapojená do hvězdy a do lomené hvězdy, u kterých nemůže být svorky N během zkoušky uzemněna);
- b) proud tekoucím vinutím (pro vinutí zapojená do hvězdy a do lomené hvězdy, u kterých nemůže být svorka N během zkoušky uzemněna);
- c) přenesený proud do přílehlého zkratovaného a nezkoušeného vinutí (kapacitně přenesený proud)
- d) proud snímaný z nádoby
- e) napětí přenesené do nezkoušeného vinutí.

Součet položek a), c) a d) nebo položek b), c) a d) se někdy nazývá jako *proud fáze* [5].



Obr. 31. Proud tekoucí N svorkou při zkoušce atmosf. impulsu – bez poruchy [5].

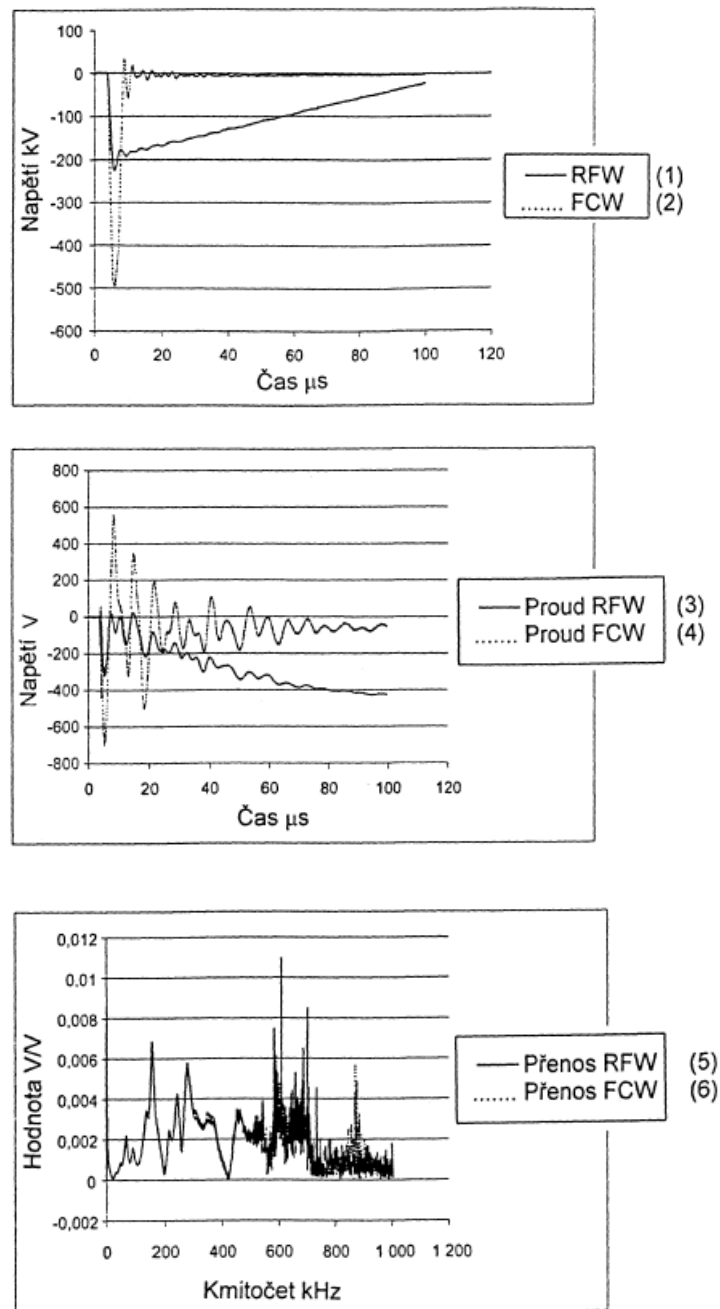
4.4.2 Metoda přenosové funkce

U této metody převádíme záznamy pořízené v reálném čase (přiložené napětí $U(t)$ a výsledné impulzní proudové odezvy $I(t)$ a to buď měřením proudu tekoucího přes svorku N nebo proudu mezi zkratovými nezkoušenými vinutím a zemí) do kmitočtového pásma $U(\omega)$ a $I(\omega)$ pomocí algoritmů rychlé Fourierovy transformace (FFT). Potom spektra napětí a proudu mohou být matematicky tvořena vztahy:

- a) podílem $I(\omega)/U(\omega)$, který vyjadřuje funkci přenosové admitance nebo
- b) podílem $U(\omega)/I(\omega)$, který vyjadřuje funkci přenosové impedance.

Z hlediska transformátoru jako pasivní části sítě jsou funkce admitance i funkcemi impedance považovány za charakteristické funkce v kmitočtové oblasti a měly by být nezávislé na tvaru vlny. Protože napěťové spektrum $U(\omega)$ neobsahuje nulové body, je pro účely analýzy pomocí přenosové funkce přednostně použita funkce přenosové admitance $I(\omega)/U(\omega)$. Z teorie čtyřpólů, která matematicky popisuje vztah mezi vstupními a výstupními veličinami v časové a frekvenční oblasti v rámci lineárních elektrických sítí, jsou pro potřeby přenosové funkce rozeznáváme následující znaky poruchy:

- jakýkoli posun výrazných pólů přenosové funkce označuje poškození části vinutí,
- jakékoli zploštění pólů ukazuje na přítomnost částečných výbojů [5].



POZNÁMKA Porovnání vlny plného atmosférického impulsu se sníženou hladinou (RFW) a useknutou vlnou s plnou hladinou (FCW) přiložených na stejnou svorku stejného transformátoru. Protože useknutá vlna obsahuje z hlediska admitanční přenosové funkce více vstupních vysokofrekvenčních komponentů, objeví se rozdíly mezi přenosovými funkcemi pro RFW a FCW pouze v oblasti vysokých kmitočtů.

Legenda

- | | | | |
|---|------------------------------------|---|---------------------------------------|
| 1 | plná vlna se sníženou hladinou RFW | 4 | proud tekoucí svorkou N při FCW |
| 2 | useknutá vlna s plnou hladinou FCW | 5 | přenosová (admitanční) funkce při RFW |
| 3 | proud tekoucí svorkou N při RFW | 6 | přenosová (admitanční) funkce při FCW |

Obr. 32. Příklad přenosové funkce [5].

4.4.3 Využití akustických odezev

Tato metoda je založena na principu snímání ultrazvukových projevů transformátorů z povrchu jeho nádoby. Tato metoda je používána před uvedením výkonových transformátorů do provozu i při revizích strojů pracujících v elektrizační soustavě. Akustická měření lokalizují a indikují izolační poruchy po neúspěšné rázové zkoušce, popř. se provádí jako součást každé zkoušky atmosférickým impulsním napětím, ta by měla zachytit odezvy předprůrazových nedestruktivních výbojových dějů, které jsou většinou důsledkem nedokonalostí v technologickém zpracování jako neprosycené izolace, uzavřené vzduchové dutiny. Vyhodnocení se provádí pomocí digitálního osciloskopu, který je připojen přes předzesilovač koaxiálním kabelem na napěťový signál, který je ekvivalentní akustické odezvě.



Obr. 33. Umístění akustických sond u metody akustických odezev

Rozmístění sond na nádobě transformátoru je určeno dle typu stroje a zkoušky. Sonda se přikládají tak, aby se sledovala např. rázový fáze, většinou se ale umístí na středy protilehlých stran nádoby. Výhodou této metody je snadná instalace, která nevyžaduje žádný zásah do provozních režimů stroje [9].

4.5 Protokoly z impulzních zkoušek

O výsledky každé zkoušky je třeba vypracovat protokol z impulzních zkoušek provedených na zkoušeném objektu, který by měl obsahovat následující informace:

- **obecné informace** – typ, jmenovitý výkon a napětí zkoušeného zařízení
- výrobní číslo
- pozici odbočky, na které byla zkouška prováděna
- místo a datum zkoušky
- údaje o zkušebním technikovi výrobce
- údaje o zástupci odběratele
- normu, podle které je zařízení zkoušeno
- stanovené zkušební hladiny a tvary vln

- **informace o impulzních zkouškách provedených na každé svorce**
- druhu a velikosti zkušební vlny
- číslování záznamů pro identifikaci a snazší odkazy
- aktuální zkušební napětí pro plný nebo useknutý atmosférický impulz a pro spínací impulz
- aktuálně nastavených parametrů uspořádaných pro impulzní generátor
- aktuálních parametrů tvarů vlny pro atmosférický impulz (T_1 , T_2 , T_c) a pro spínací impulz (T_1 , T_d , T_z)
- nákresu zapojení pro každou zkoušku vč. značení svorek, svorku, na které bylo napětí přiloženo, uspořádání zemnění nezkoušených svorek, zahrnující hodnoty uzemňovacích odporů nebo impedancí, uspořádání a umístění měření napětí a proudu.

Důležitou součástí protokolu o zkoušce jsou tištěné formy příslušných záznamů získaných během zkoušek. Je-li požadováno, měly by být záznamy řádně identifikovány a uspořádány tak, aby bylo možné provést nezbytná porovnání mezi plnými a useknutými vlnami. Každý oscilogram nebo digitální záznam by měl obsahovat měřítko os.



Obr. 34. Příklad porušení izolace výkonového transformátoru

Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo praktické ověření vlivů atmosférických jevů na rozložení napětí ve vinutí transformátoru, při kterých dochází k nerovnoměrnému zatěžování jeho izolace.

Pro zabezpečení spolehlivosti transformátoru je třeba užít metod, které tyto nepříznivé vlivy potlačují či zcela odstraňují, a to kdy se počáteční rozložení atmosférického impulsu ve vinutí transformátoru nepříliš liší od konečného.

Z jednotlivých výsledků je zřejmý vliv charakteristických veličin transformátoru, zejména pak jeho kapacity, které ovlivňují výsledné rozložení napětí na vinutí. Nejlepších výsledků bylo dosaženo u metody prokládaného vinutí transformátorů, kde se prakticky počáteční rozložení napětí nelišilo od konečného, avšak tato metoda je obtížnější, vyžaduje daleko složitější konstrukci a technologii výroby vinutí.

Při uvádění výkonového transformátoru do provozu je nutno provést odpovídající zkoušky, které ověří spolehlivost stroje při namáhání atmosférickými jevy. K tomu se využívá rázový generátor pro generování atmosférických impulzů, ke kterému je zkoušený transformátor připojen. Zde se setkáváme s problematikou dodržení tvaru vlny, jejíž tvar je určen převážně kapacitami a odpory generátoru, ale i impedancí zátěže.

Jelikož však provádíme zkoušky na zařízení, u kterých izolace zůstává po průrazu trvale poškozená, je nutno aplikovat malý počet impulzů o velikosti jmenovitého výdržného napětí. K záznamu těchto zkoušek využíváme analogových a digitálních záznamových systémů; dnes upřednostňujeme digitální formu záznamu, která vytváří předpoklady pro matematickou interpretaci výsledků a umožňuje využití dostatečného matematického zpracování při analýze poruch metodou přenosové funkce. Je však třeba zdůraznit, že tento postup není plně využitelný ve všech případech a v současné době je doporučován jako doplňující prostředek v procesu vyhodnocování výsledků. Konečné posouzení výsledků zkoušky je stále založeno na srovnávání tvarů vln.

Prakticky jsem ověřil, že pro účely prokázání shody výsledků porovnáváním průběhů je důležité mít průběhy získané digitálním měřením v nezpracovaných datech, aniž by byly podrobeny filtrační či vyhlazovací funkcí a nezpůsobily tak odfiltrování a nemožnost tak odhalit vznikající poruchu či ovlivnit nezávislost průběhu funkce přenosové admitance.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DANIEL MAYER.: *Úvod do teorie elektrických obvodů*. Praha: SNTL, 1978. 688 s.
- [2] VEVERKA, A.: *Technika vysokých napětí*, SNTL, Praha 1982
- [3] Ročenka elektro 2014, FCC Public, Praha 2014, 315s
- [4] Norma ČSN EN 60076-3, Český normalizační institut, Praha 2001
- [5] Norma ČSN EN 60076-4, Český normalizační institut, Praha 2003
- [6] Norma ČSN EN 60060-1, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha 2011
- [7] Norma ČSN EN 61083-2, Český normalizační institut, Praha 2000
- [8] Kopeček, D.: Analýza rozložení rázového napětí na vinutí transformátoru bakalářská práce, Plzeň 2002
- [9] Zach, T.: Výkonové transformátory při zkoušce atmosférickým impulsním napětím, diplomová práce, Plzeň 2007

Seznam obrázků

Obr. 1. Charakteristické hodnoty rázové vlny [6].	13
Obr. 2. K odvození rovnic homogenního vedení, vymezení délkového elementu a podélné parametry délkového vedení [1].	15
Obr. 3. Šíření vln napětí podél ideálního vedení zakončeného cívkou [1].	18
Obr. 4. Náhradní schéma jedno polohové cívky [8].	23
Obr. 5. Náhradní schéma jednopohové cívky.	25
Obr. 6. Počáteční rozložení napětí na cívce s uzemněným koncem pro různé γ_l [2].	26
Obr. 7. Prostorové rozložení prvních tří harmonických na cívce s uzemněným koncem [2].	30
Obr. 8. Počáteční rozložení napětí na cívce s volným koncem pro různá γ_l [2].	31
Obr. 9. Prostorové rozložení prvních tří harmonických na cívce s volným koncem [2].	32
Obr. 10. Náhradní schéma [8] a) bez příčných kapacit (kapacit závitů vůči zemi)	34
Obr. 11. Rozložení maxim. rázových namáhání proti zemi u transformátorů s $\gamma_l=10$ [8].	35
Obr. 12. Změna napětí proti zemi v bodě a při vstupu vlny [8].	35
Obr. 13. Vznik kusé vlny (3), křivka (1) je původní vlna a vlna (2) je vlna opačné polarity se strmým čelem [8].	36
Obr. 14. Označení rozměrů cívkového vinutí [8].	37
Obr. 15. Schéma kompenzace kapacity proti zemi stíněním pro homogenní vinutí [8].	38
Obr. 16. Počáteční rozložení a obálky volných kmitů u transformát. s neúplným stíněním [8].	39
Obr. 17. Prokládané vinutí [8].	40
Obr. 18. Základní uspořádání zkušebního obvodu [5].	42
Obr. 19. Schéma jednostupňového rázového generátoru napětí [5].	43
Obr. 20. Schéma generátoru napětí v Marxově řazení [2].	44
Obr. 21. Parametry ovlivňující tvar vlny u vysokoimpedančních vinutí [5].	46
Obr. 22. Parametry ovlivňující tvar vlny u nízkoimpedančního vinutí [5].	48
Obr. 23. Tlumená oscilace [5].	49
Obr. 24. Výsledná kalibrační křivka.	51
Obr. 25. Zapojení fázových svorek [5].	55
Obr. 26. Příklad zapojení zkoušeného výkonového transformátoru.	55
Obr. 27. Atmosférický impulz při zkoušce plnou vlnou [5].	58
Obr. 28. Vliv nastavení frekvenčního pásma.	59
Obr. 29. Vliv nastavení vzorkovací frekvence	60
Obr. 30. Vliv vyhlazovacích algoritmů	60
Obr. 31. Proud tekoucí N svorkou při zkoušce atmosf. impulzu – bez poruchy [5].	61
Obr. 32. Příklad přenosové funkce [5].	63
Obr. 33. Umístění akustických sond u metody akustických odezev.	64
Obr. 34. Příklad porušení izolace výkonového transformátoru	66

Seznam tabulek

Tab. 1. Zkouška metodou nahoru-dolů.....	19
Tab. 2. Zkouška metodou více hladinami.....	20
Tab. 3. Různé kategorie vinutí dle nejvyššího napětí U_m [4].	21
Tab. 4. Jmenovitá výdržná napětí pro vinutí transformátoru s $U_m \leq 170\text{kV}$ [4].....	22
Tab. 5. Kalibrační tabulka	51