ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zkoušky atmosférickým impulzním napětím
-
Výkonové transformátory

vedoucí práce: **Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.**

autor: **Ondřej Patočka**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2011/2012**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Ondřej PATOČKA**
Osobní číslo:	**E10N0107P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Elektroenergetika**
Název tématu:	**Zkoušky atmosférickým impulzním napětím - Výkonové transformátory**
Zadávající katedra:	**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování:

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. Analyzujte parametry obvodu pro generování atmosférických impulzů. Uveďte, které parametry obvodu (včetně zkoušence) ovlivňují tvar impulzu a jakým způsobem.
3. Zpracujte teoretický rozbor chování výkonového transformátoru vystaveného tomuto typu napětí a modelově ověřte.
4. Popište stručně 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:	

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:	**Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.** Katedra elektroenergetiky a ekologie
Datum zadání diplomové práce:	**17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce:	**11. května 2012**

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

L.S.

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

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Cílem této práce je vysvětlit problematiku namáhání izolace vinutí u výkonových transformátorů po příchodu rázového impulzního napětí na vstupní svorky. Je zde uvedena základní teorie rázových jevů, resp. popis chování vinutí při atmosférických dějích pro uzemněný a izolovaný konec vinutí.

Neméně důležitou součástí je praktické měření na navrženém modelu cívky a jeho vyhodnocení. A na závěr je vyhodnoceno snímání impulzu digitálním osciloskopem.

Klíčová slova

Atmosférický děj, atmosférický impulz, rozložení napětí, rázová zkouška, digitální záznam, výkonový transformátor

Abstract

The aim of this work is to explain of the exertion power tranformer winding isolation after coming of impulsive surge voltage on the input terminals. The basic theory of the impulse phenomenons is presented here, respectively the description of the behavior of atmospheric processes in the winding grounded and isolated for the end windings.

Another important part is the practical measurement of the proposed model coil and evaluation. Finally, evaluated impluse by digital oscilloskope.

Key words

Atmospheric process, atmospheric impulse, voltage distribution, surge test, digital recording, power transformer

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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.

V Plzni dne 7.5.2012

Jméno příjmení

……..

Poděkování

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

Obsah

OBSAH **8**

ÚVOD **9**

SEZNAM SYMBOLŮ **10**

1 ATMOSFÉRICKÉ IMPULZNÍ PŘEPĚTÍ A KOORDINACE IZOLACE **11**

1.1 VZNIK ATMOSFÉRICKÉHO IMPULZU 11
1.2 ŠÍŘENÍ ATMOSFÉRICKÉHO IMPULZU PO VEDENÍ 12
1.3 KOORDINACE IZOLACE 17
1.4 SOUHRN NOREM 20

2 PARAMETRY OBVODU A PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ TVAR VLNY **21**

2.1 ZKUŠEBNÍ OBVOD 21
2.1.1 Hlavní obvod *21*
2.1.2 Obvod pro měření *23*
2.2 KOMPLETNÍ ZKUŠEBNÍ OBVOD 24
2.3 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ TVAR IMPULZU 25
2.3.1 Normalizovaný atmosférický impulz *25*
2.3.2 Tvary vln *26*
2.3.3 Princip ovlivňování tvaru vlny *27*
2.4 KALIBRACE 31

3 CHOVÁNÍ TRANSFORMÁTORU PŘI ZKOUŠCE ATMOSFÉRICKÝM IMPULZNÍM NAPĚTÍM A PŘI ZKOUŠCE USEKNUTÝM IMPULZEM **32**

3.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY 32
3.2 MĚŘICÍ OBVOD 35
3.2.1 Ověření elektrického namáhání *36*
3.3 VLASTNOSTI VINUTÍ PŘI RÁZOVÉM NAMÁHÁNÍ 38
3.3.1 Měření modelu jednopolohové cívky *38*
3.3.2 Měření lokomotivních cívek *42*
3.4 VÝSLEDKY A JEJICH ZHODNOCENÍ 44
3.4.1 Prokládaná vinutí *44*
3.4.2 Kompenzace kapacit proti zemi *45*

4 ZKUŠEBNÍ POSTUPY A VYHODNOCENÍ ZÁZNAMU **48**

4.1 ZKOUŠKY ATMOSFÉRICKÝM IMPULZEM 48
4.1.1 Zkušební postupy *48*
4.1.2 Metody vhodné pro detekci poruch *49*
4.2 ANALOGOVÉ A DIGITÁLNÍ ZÁZNAMOVÉ SYSTÉMY 50
4.2.1 Analogový záznam průběhu *51*
4.2.2 Digitální záznam průběhů *51*
4.2.2.1 Digitální záznam průběhu impulzu napětí *52*
4.2.2.2 Digitální záznam tvaru impulzu proudové odezvy *53*
4.3 NASTAVENÍ DIGITÁLNÍHO OSCILOSKOPU 53

5 ZÁVĚR **56**

POUŽITÁ LITERATURA **1**

Úvod

Elektrická energie je jedním z nejdůležitějších faktorů pro život dnešní společnosti. V dnešní době si život bez elektrické energie jen málo kdo dovede představit. A proto jsou kladeny obrovské nároky na spolehlivost a bezpečnost dodávky elektrické energie. Dodávka elektrické energie je závislá na spolehlivosti elektrizační soustavy. Spolehlivost elektrizační soustavy je dána spolehlivostí dílčích prvků. Mezi velmi důležité prvky soustavy patří transformátory. Tento prvek v rozvodu a přenosu elektrické energie je podrobován celé řadě diagnostických měření a normami předepsaných zkoušek.

Tato práce se zabývá zkouškou impulzním napětím, která je daná normou. Zaměřena je tedy především na zkoušku atmosférickým impulzním napětím.

V první kapitole je nastíněn vznik atmosférického impulzu tzv. blesku. Následně popsáno šíření onoho impulzu po vedení způsobeném přímým nebo nepřímým úderem blesku. Na to navazuje provedení koordinace izolace.

V druhé části je popsán kompletní zkušební obvod pro zkoušku atmosférickým impulzem, který má vytvořit normalizovaný atmosférický impulz. Následně jsou uvedeny parametry, kterými se dá ovlivnit tvar generovaného impulzu.

V návaznosti na předcházející kapitoly a na zadání práce, jsem ve třetí části zpracoval měření týkající se napěťových poměrů u jednopolohové cívky a druhé měření se týkalo rozložení napětí podél lokomotivních cívek. V návaznosti na měření jsem uvedl možnosti pro zlepšení rozložení napětí podél vinutí.

V poslední kapitole se zaměřuji na analogový a digitální záznam snímaného impulzu. Ale větší pozornost jsem věnoval digitálnímu záznamu napětí a digitálnímu záznamu proudové odezvy. A v neposlední řadě jsem zjišťoval, jaké parametry digitálního osciloskopu mají vliv na snímaný průběh impulzu.

Seznam symbolů

i	- okamžitá hodnota elektrického proudu
u	- okamžitá hodnota elektrického napětí
R	- elektrický odpor
L	- indukčnost
C	- kapacita
G	- vodivost
T_1	- doba čela
T_2	- doba půltýlu
t	- časový úsek
Δx	- délkový element
Gn	- generátor
OSC	- digitální osciloskop
Mod_1	- jednopolohová cívka
Mod_2	- lokomotivní cívka

1 Atmosférické impulzní přepětí a koordinace izolace

Impuls je účelově přiložené aperiodické přechodové napětí nebo proud. Obvykle rychle narůstá do vrcholové hodnoty a potom pomaleji klesá k nule. Pro zvláštní účely se používají impulsy s přibližně lineárně rostoucím čelem, nebo s přechodovými oscilacemi, nebo přibližně pravoúhlého tvaru. Atmosférický impulz je definován nárůstem doby čela do 20μs.

1.1 Vznik atmosférického impulzu

Atmosférická přepětí (LEMP) jsou nejnebezpečnější a jsou vyvolaná především bouřkami s výboji blesku. Blesk je v podstatě elektrický výboj mezi elektrickým nabitým mrakem a zemí (zemní blesky), mezi dvěma a více mraky navzájem, nebo mezi jednotlivými částmi jednoho mraku. Pouze nepatrná část výbojů se uskutečňuje mezi mraky a zemí. Blesky vznikají v bouřkových buňkách, které dosahují průměru až několika kilometrů. Každá bouřková buňka je aktivní nejvýše po dobu 30 minut a generuje průměrně dva až tři blesky za minutu, které vznikají při intenzitě elektrického pole řádově stovky kV/m. Ve středu bouřkové buňky existuje silný vzestupný proud, který způsobuje oddělení pozitivních a negativních nábojů. Pozitivní náboj se většinou váže na krystalky ledu v horní části buňky, zatím co negativní náboj je většinou vázán na vodní kapky v dolní části. V blízkosti země dochází k nabíjení bouřkových buněk pozitivním nábojem v důsledku sršivých výbojů především z lesních porostů. Četnost bouřek a tudíž i četnost atmosférických impulzů závisí na ročním období.

Atmosférická přepětí na venkovních vedeních vznikají při bouřkách:

- nepřímými údery (indukovaná přepětí)
- přímými údery do fázových vodičů
- přímými údery do zemnících lan
- přímými údery do stožárů

Indukované přepětí se tvoří elektrostatickou a elektromagnetickou indukcí od blesku, který nezasáhne přímo vedení. Podle měření v sítích jsou indukovaná přepětí ve většině případů menší než 100 kV a dosahují maxima asi 200 kV. Musí se s nimi počítat v sítích VN do 35 kV.

Při přímém úderu blesku do fázového vodiče se šíří po vedení od místa úderu na obě strany přepěťová vlna, která namáhá izolaci proti zemi. Amplituda vlny dosahuje milionů voltů, tj. více než je rázová pevnost izolace přenosu nejvyšších jmenovitých napětí. Vlna přepětí v jednom vodiči indukuje napětí v sousedních vodičích.

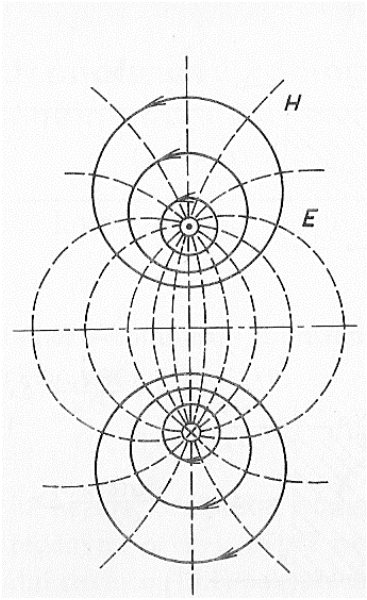
Přímý úder do zemnícího lana v rozpětí způsobuje na laně vlny napětí postupující na obě strany od místa úderu, které elektromagnetickou vazbou indukují napětí ve vodičích. Napětí zatěžující izolaci je dáno rozdílem napětí na laně a na vodičích. Je-li toto napětí vyšší než přeskokové napětí, dojde mezi zemnícím lanem a jedním, popř. i několika vodiči ke zpětnému přeskoku.

Přímý úder do stožáru způsobuje na vrcholu stožáru přepětí, jehož velikost závisí na vlnové impedanci zemnících lan, vodičů, na délce rozpětí, na odporu uzemněného stožáru, na indukčnosti a vlnové impedanci stožáru a na strmosti proudu blesku. Opět může dojít ke zpětnému přeskoku. [1]

1.2 Šíření atmosférického impulzu po vedení

Prozkoumáme typický jednorozměrný obvod s rozprostřenými parametry: lineární homogenní vedení. Jsou odvozeny obecné rovnice homogenního vedení, jež jsou řešeny jednak pro harmonický ustálený stav, jednak pro neustálený stav vedení. Pozornost je věnována elektrotechnické interpretaci matematického řešení založené na představě, že napěťové a proudové poměry ve vedení jsou superpozicí hlavních a odražených vln pohybujících se vedením fázovou rychlostí. [2]

Uvažujme jednofázové homogenní vedení tvořené dvojicí rovnoběžných vodičů (obr. 1). Homogenní vedení charakterizují čtyři parametry, udávané na jednotku délky vedení (obvykle na 1 km): odpor R a indukčnost L smyčky tvořené dvojicí vodičů a kapacita C a vodivost G mezi oběma vodiči. Tyto parametry budeme považovat pro dané vedení za konstanty.



Obr. 1: Silové čáry elektromagnetického pole dvouvodičového vedené [2]

Odvodíme základní rovnice pro napětí a proud homogenního vedení. Ve vzdálenosti x od začátku vedení vymezíme elementární dvojbran, obr. 2. Aby výstupní veličiny měli stejné nezávisle proměnné jako vstupní veličiny (čas *t* a délkovou souřadnici *x*), rozvineme výstupní veličiny v Taylorovu řadu a zanedbáme členy obsahující druhou derivaci a vyšší derivace:

$$u(t; x + \Delta x) \doteq u(t; x) + \frac{\partial u(t;x)}{\partial x}\Delta x$$

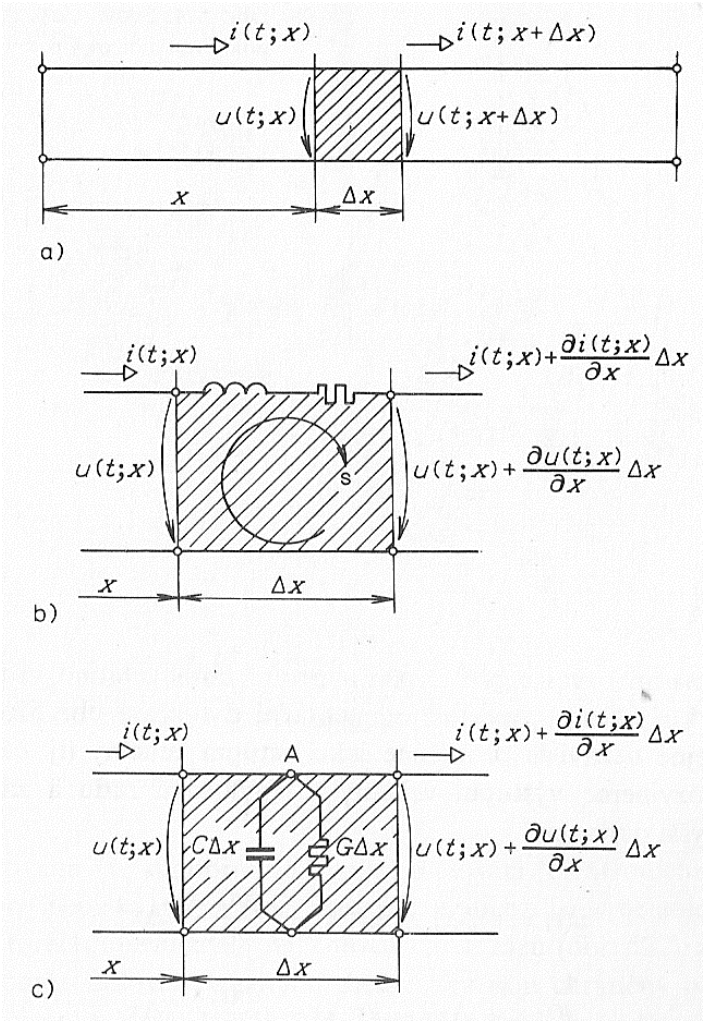
$$i(t; x + \Delta x) \doteq i(t; x) + \frac{\partial i(t;x)}{\partial x}\Delta x$$

Podélné vlastnosti elementárního dvojbranu charakterizují parametry R a L, kdežto jeho příčné vlastnosti parametry C a G (obr. 2). Na smyčku aplikujeme druhý Kirchhoffův zákon a na uzel A první Kirchhoffův zákon. Po úpravě dostaneme rovnice

$$-\frac{\partial u(t;x)}{\partial x} = Ri(t;x) + L\frac{\partial i(t;x)}{\partial t} \tag{1.1}$$

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

Řešením této soustavy lineárních parciálních diferenciálních rovnic je napětí $u = u\,(t;\,x)$ a proud $i = i(t;\,x)$ v kterémkoli místě x homogenního vedení a v kterémkoliv okamžiku t.



Obr. 2: K odvození rovnic homogenního vedení: vymezení délkového elementu homogenního vedení (a); podélné parametry délkového elementu (b); příčné parametry délkového elementu [2]

Eliminací proudu i z obou rovnic nalezneme, že napětí homogenního vedení lze vyjádřit lineární homogenní parciální diferenciální rovnicí 2. řádu:

$$-\frac{\partial^2}{\partial x^2} + RG_u + (LG + RC)\frac{\partial u}{\partial t} + LC\frac{\partial^2}{\partial t^2} = 0 \qquad (1.2)$$

Obdobně eliminací napětí u nalézáme rovnici pro proud i:

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} + RGi + (LG + RC)\frac{\partial i}{\partial t} + LC\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} = 0 \qquad (1.3)$$

Rovnice vedení a její řešení vychází z rovnice pro ideální vedení. Rovnice (1.1) nabývá pro R = 0; G = 0 tvar

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{1.4}$$

Tato rovnice se nazývá - vlnová rovnice. Jejím řešením je

$$u(t;\ x) = f_h\left(t - x\sqrt{LC}\right) + f_0(t + x\sqrt{LC}) \tag{1.5}$$

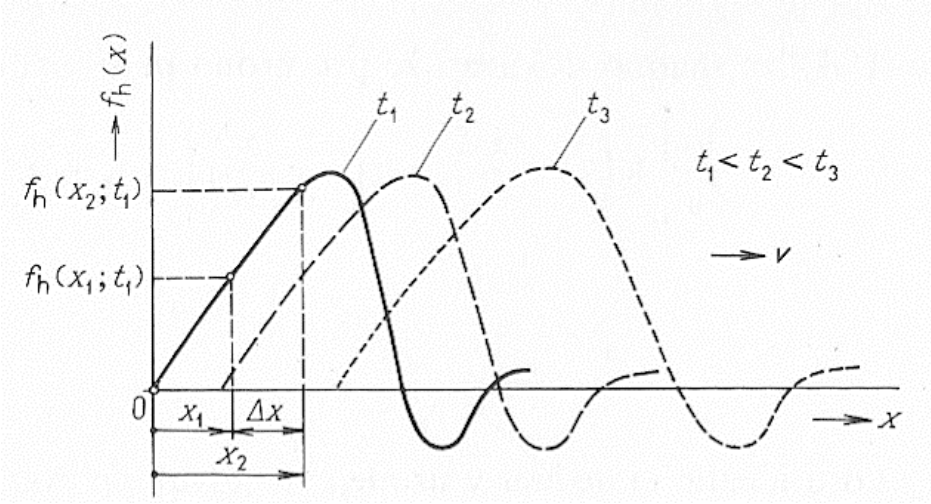
Tvar funkcí f_h a f_o se určí z daného napětí na začátku nebo na konci vedení.

Nejprve diskutujme funkci $f_h = \left(t - x\sqrt{LC}\right)$. V okamžiku $t = t_1$ má v místě $x = x_1$ hodnotu $f_h(t_1 - x_1\sqrt{LC})$ a v místě $x = x_2$ má hodnotu $f_h(t_1 - x_2\sqrt{LC})$. Zřejmě lze nalézt takový okamžik $t_2 > t_1$, aby v místě $x_2 > x_1$ měla funkce f_h hodnotu $f_h(t_1 - x_1\sqrt{LC})$, tj. aby

$$f_h\left(t_1 - x_1\sqrt{LC}\right) = f_h(t_2 - x_2\sqrt{LC}) \tag{obr. 3}$$

Tato rovnost bude splněna, když bude

$$t_1 - x_1\sqrt{LC} = t_2 - x_2\sqrt{LC} \tag{1.6}$$



Obr. 3: K diskusi funkce $f_{h=} f_h(t - x\sqrt{LC})$ [2]

Označíme-li

$$x_2 - x_1 = \Delta x; \qquad t_2 - t_1 = \Delta t$$

plyne z rovnice (1.6)

$$\Delta t = \Delta x = \sqrt{LC}$$

Z uvedeného je patrné, že hodnota funkce f_h v místě x_1 a v čase t_1 se opakuje v místě x_2 v čase t_2, přičemž časový interval Δt je úměrný vzdálenosti Δx mezi těmito úseky, pak funkce $f_h(t; x) = u_h$ představuje postupnou vlnu napětí, která zachovává svůj tvar a pohybuje se podél

vedení (ve směru osy x) konstantní rychlostí

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{1.7}$$

Jelikož tato vlna postupuje od začátku vedení k jeho konci, hovoříme o hlavní vlně napětí.

Obdobně lze diskutovat funkci $f_o(t + xLC) = u_o$, jež představuje postupnou vlnu napětí, která zachovává svůj tvar a pohybuje se podél vedení (proti směru osy x) konstantní rychlostí. Nazýváme ji odraženou vlnou napětí.

Zcela obdobně lze vyšetřit proudové poměry. Pro ideální vedení přechází rovnice (1.3) na vlnovou rovnici

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = LC\frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \tag{1.8}$$

jejíž řešení

$$i(t;x) = \varphi_h\left(t - \frac{x}{v}\right) + \varphi_0\left(t + \frac{x}{v}\right) \tag{1.9}$$

lze interpretovat opět jako složení hlavní vlny proudu a odražené vlny proudu.

Napětí lze vyjádřit podle rovnic (1.5) a (1.7) ve tvaru

$$u(t;x) = f_h\left(t - \frac{x}{v}\right) + f_o\left(t + \frac{x}{v}\right) = u_h + u_o \tag{2.0}$$

Pomocí rovnice (1.1) lze snadno dokázat, že pro proud platí vztah

$$i(t;x) = \frac{1}{Z_0}\left[f_h\left(t - \frac{x}{v}\right) - f_0\left(t + \frac{x}{v}\right)\right] = i_h - i_0 \tag{2.1}$$

kde konstantu

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{2.2}$$

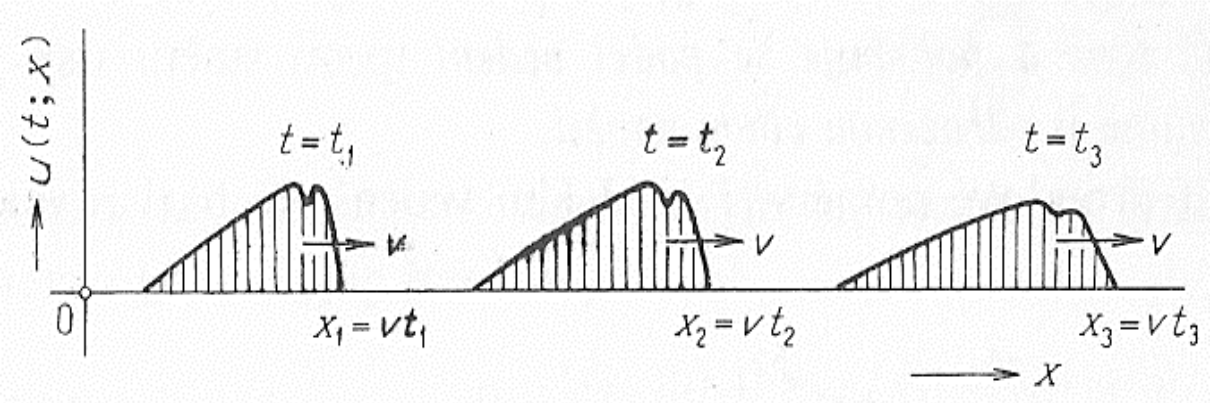
nazveme (stejně jako u ideálního vedení v ustáleném stavu) vlnovou impedancí.

Z rovnice (2.0) a (2.1) plyne, že pro hlavní a odraženou vlnou proudu platí

$$i_h = \frac{u_h}{Z_0}; \qquad i_0 = \frac{u_0}{Z_0}; \tag{2.3}$$

U skutečného vedení je šíření rázových vln složitější. Uplatňuje se odpor a svod vedení. Při rychlých časových změnách (v oblasti čela vlny) je velikost odporu a vnitřní indukčnosti ovlivněna povrchovým jevem. Kromě toho dochází ke ztrátám elektromagnetické energie vyzařováním. U silnoproudých vedení často přesahuje hodnota napěťové vlny počáteční napětí vzniku koróny, která též ovlivňuje šíření rázových vln. Působením těchto vlivů dochází ke zkreslení (deformaci) tvaru postupných vln napětí a proudu. Při postupu vedením se jejich čelo zplošťuje, týl se posouvá a jejich okamžité hodnoty se tlumí. Zkreslení

napěťové vlny se zřetelem na elektrické namáhání izolantů příznivé. Jako příklad zkreslení postupné vlny napětí je na obr. 4 zachycen tvar vlny ve třech po sobě jdoucích okamžicích *(t_1, t_2, t_3)*. [2]



Obr. 4: Změna tvaru rázové vlny napětí šířící se na skutečném vedení [2]

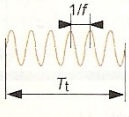
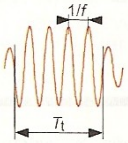
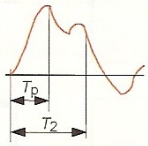
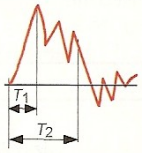
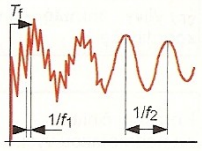
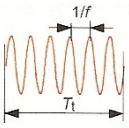
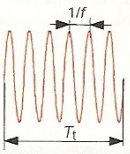
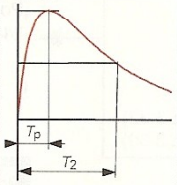
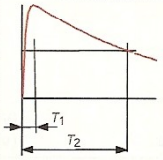
Nemůžeme zabránit vzniku atmosférických přepěťových impulzů, které mají negativní vliv na životnost jednotlivých zařízení v elektrizační soustavě. Musíme proto při navrhování zařízení správně zvolit typ izolace s ohledem na možné příchozí přepěťové impulzy. Následně tato problematika je popsána v kapitole 1.3.

1.3 Koordinace izolace

Metoda koordinace izolace spočívá ve volbě nejvyššího napětí pro zařízení společně se souborem normalizovaných jmenovitých výdržných napětí, která charakterizují izolaci zařízení požadovanou pro použití. Normalizovaná výdržná napětí musí být vybrána z přehledu řad u normalizovaných jmenovitých výdržných napětí. Soubor zvolených normalizovaných hladin napětí (tab. 2 a tab. 3) určuje jmenovité izolační hladiny.

U napětí a přepětí namáhajících izolaci musí být určena amplituda, tvar a doba trvání pomocí systémové analýzy, která zahrnuje volbu a umístění zařízení pro ochranu a pro omezení přepětí.

Pro každou třídu napětí a přepětí musí být na základě analýzy určena reprezentativní hladina napětí a přepětí určuje charakteristiky izolace, s ohledem na různé chování při tvarech napětí a přepětí v síti a na normalizované tvary napětí použitých při normalizované výdržné zkoušce, jak je uvedeno v tabulce 1. [3]

Třída	S nízkým kmitočtem		Přechodné		
	Trvalé	Dočasné	S pomalým čelem	S rychlým čelem	S velmi rychlým čelem
Tvary napětí nebo přepětí					
Rozsah tvarů napětí nebo přepětí	f = 50 Hz nebo 60 Hz $T_t \geq$ 3 600 s	10 Hz < f < 500 Hz 0,02 s ≤ T_t ≤ 3 600 s	20 µs < T_p ≤ 5 000 µs $T_2 \leq$ 20 ms	0,1 µs < T_1 ≤ 20 µs $T_2 \leq$ 300 µs	$T_f \leq$ 100 ns 0,3 MHz < f_1 < 100 MHz 30 kHz < f_2 < 300 kHz
Normalizované tvary napětí	 f = 50 Hz nebo 60 Hz T_t [a]	 48 Hz ≤ f ≤ 62 Hz T_t = 60 s	 T_p = 250 µs T_2 = 2 500 µs	 T_1 = 1,2 µs T_2 = 50 µs	a
Normalizovaná zkouška výdržným napětím	a	Zkouška krátkodobým střídavým napětím	Zkouška spínacím impulzem	Zkouška atmosférickým impulzem	a

[a] Stanoví příslušné komise pro zařízení.

Tab. 1. Třídy a tvary přepětí, normalizované tvary napětí a normalizované zkoušky výdržným napětím [3]

Nejvyšší napětí pro zařízení U_m kV (efektivní hodnota)	**Normalizované krátkodobé jmenovité výdržné střídavé napětí síťového kmitočtu** kV (efektivní hodnota)	**Normalizované jmenovité výdržné přepětí při atmosférickém impulzu** kV (vrcholová hodnota)
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
17,5 [a]	38	75 95
24	50	95 125 145
36 [1]	70	145 170
52 [a]	95	250
72,5	140	325
100 [b]	(150)	(380)
	185	(450)
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170 [a]	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050
POZNÁMKA Považují-li se hodnoty uvedené v závorkách za nedostatečné k prokázání, že vyhoví požadovaným výdržným napětím fáze – fáze, jsou nutné doplňující výdržné zkoušky mezi fázemi.		
a Tato U_m se v IEC 60038 neupřednostňují a tak sou uvedeny kombinace, které v normách pro přístroje se nenormalizují příliš často. b Tyto hodnoty U_m se nezaznamenávají v IEC 60038, ale byly zavedeny v rozsahu I v některých normách pro přístroje.		

Tab. 2. Normalizované izolační hladiny rozsahu I (1 kV < U_m < 245 kV) [3]

Nejvyšší napětí pro zařízení U_m kV (efektivní hodnota)	**Normalizované jmenovité výdržné napětí při spínacím impulzu**			**Normalizované jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulzu** kV (vrcholová hodnota)
	Podélná izolace kV (vrcholová hodnota)	**Fáze - zem** kV (vrcholová hodnota)	**Fáze - fáze** (poměr k vrcholové hodnotě fáze-zem)	
300	750	750	1,50	850
				950
	750	850	1,50	950
				1 050
362	850	850	1,50	950
				1 050
	850	950	1,50	1 050
				1 175
420	850	850	1,50	1 050
				1 175
	950	950	1,50	1 175
				1 300
	950	1 050	1,50	1 300
				1 425
550	950	950	1,70	1 175
				1 300
	950	1 050	1,60	1 300
				1 425
	950 1 050	1 175	1,50	1 425
				1 550

Tab. 3. Normalizované izolační hladiny třídy II (U_m > 245 kV) [3]

1.4 Souhrn norem

Na závěr této kapitoly jsou sepsány normy, které úzce souvisí s problematikou zkoušek atmosférickým impulzním napětí na výkonových transformátorech.

- ČSN EN 60071-1 Koordinace izolace
- ČSN EN 60076-3 Výkonové transformátory – izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdušné vzdálenosti
- ČSN EN 60076-4 Výkonové transformátory – průvodce zkouškami
- ČSN IEC 60-1 Technika zkoušek vysokým napětím
- ČSNEN 60060-2 Technika zkoušek vysokým napětím – Měřicí systémy

2 Parametry obvodu a parametry ovlivňující tvar vlny

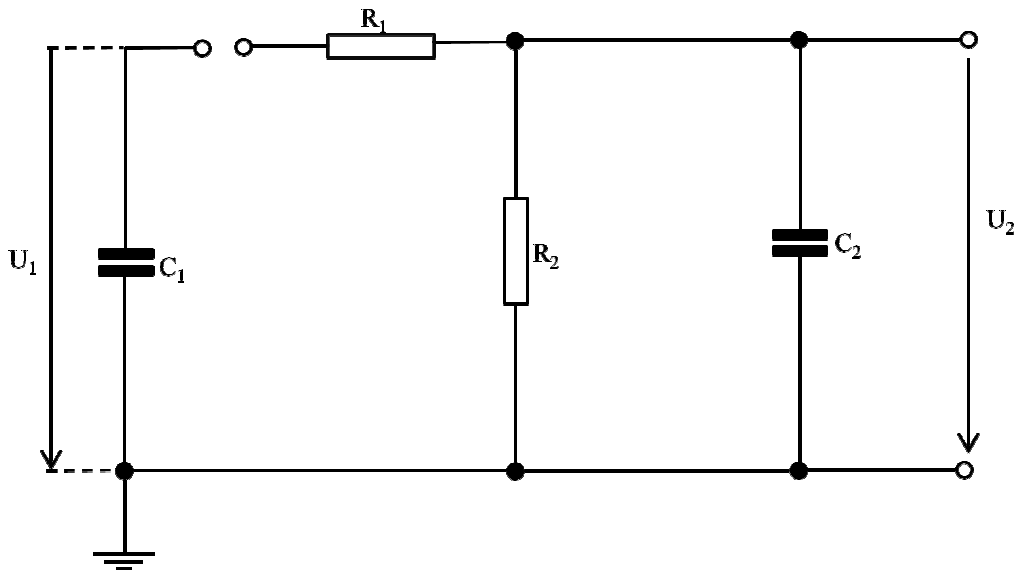
2.1 Zkušební obvod

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 impulzů tam, kde je to požadováno [5]

2.1.1 Hlavní obvod

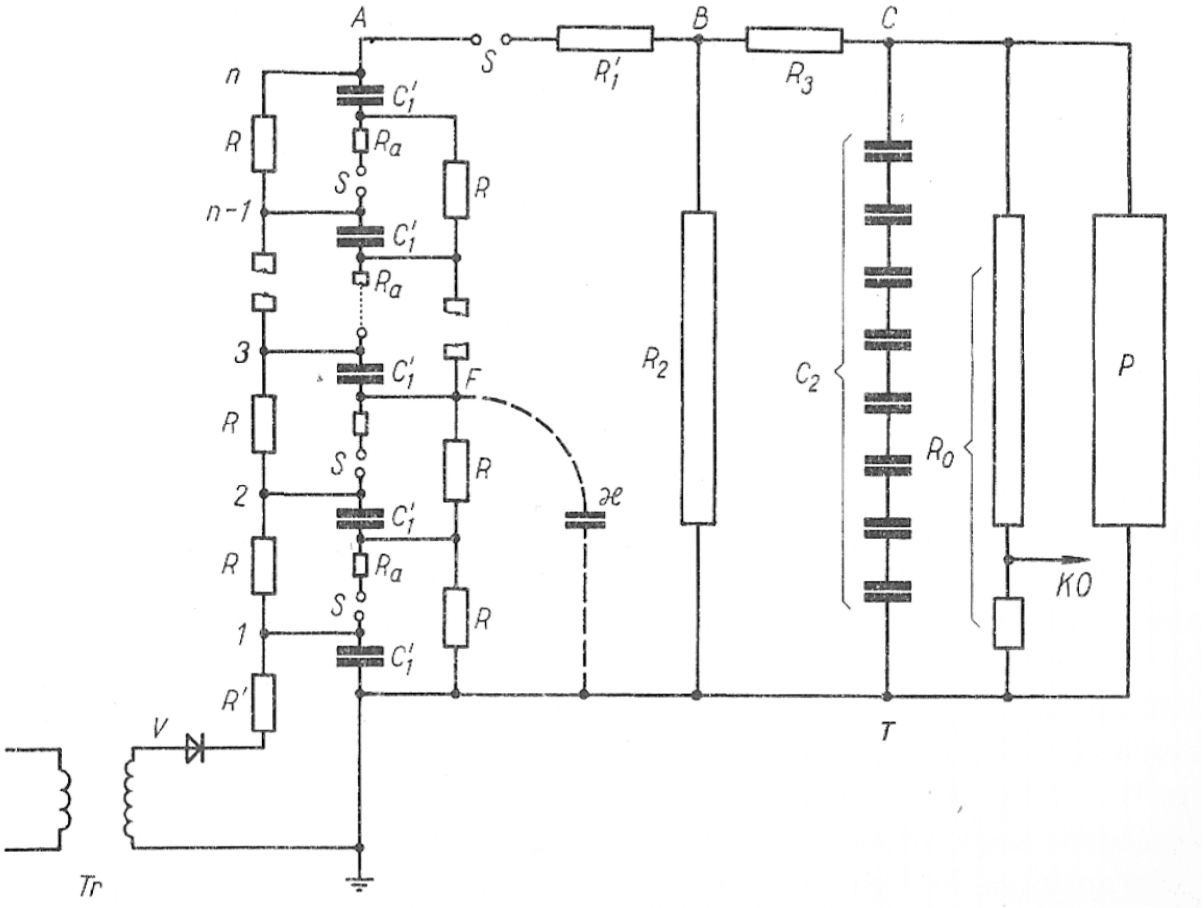
Rázové generátory se používají zejména pro zkoušení izolace (transformátorů, přístrojů, vedení), pro určení rázových charakteristik, ke zjištění ochranného působení zemnících lan a pro studium výbojů při vysokém napětí. Jedno z obvyklých zapojení rázového generátoru je na obr. 5, kde C_1 značí tzv. činnou kapacitu, C_2 zatěžovací kapacitu, R_1 čelní odpor a R_2 týlní odpor.



Obr. 5. Schéma jednostupňového rázového generátoru napětí [1]

Činná kapacita se nabije ze stejnosměrného zdroje, přičemž se vybije přes jiskřiště do obvodu R_1, C_2, R_2. Průběh týlu rázové vlny je dán prakticky 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. 6. 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 řídícími jiskřišti S do série.



Obr. 6. Schéma generátoru napětí v Marxově řazení [1]

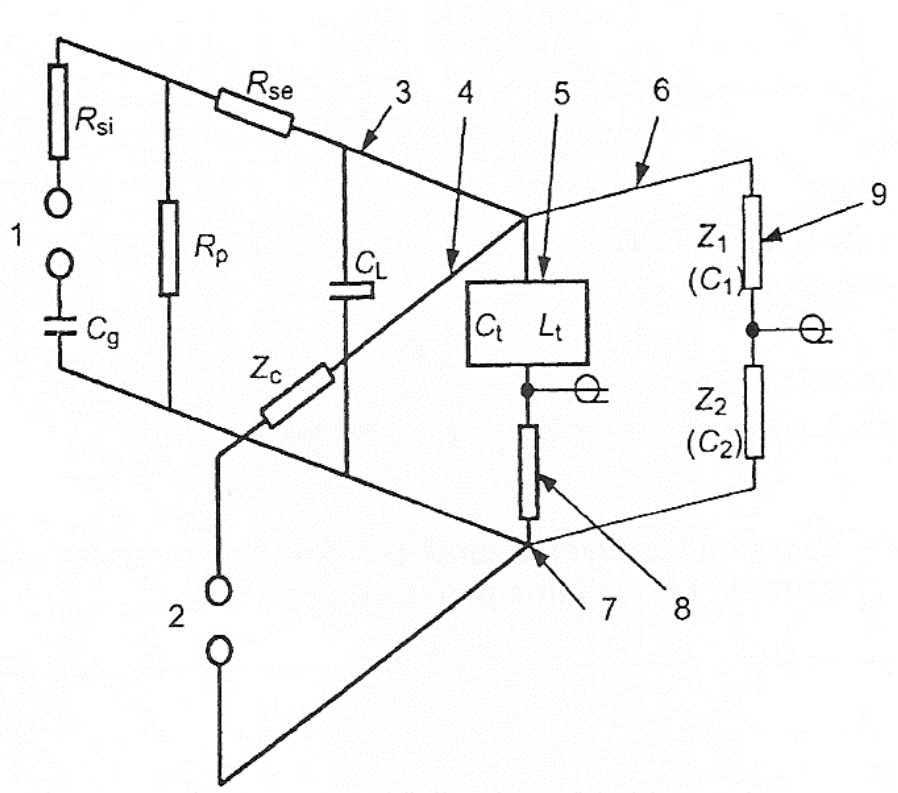
Tím se jejich napětí sečtou a kondenzátory se vybíjejí přes tlumící odpory R_a do obvodu ABCT. Po krátkou dobu rázu můžeme sériové řazení považovat za jedinou výslednou činnou kapacitu s hodnotou $C_1/n = C_1$. Vyznačené několikastupňové uspořádání je známo jako Marxovo řazení. Napětí jednoho stupně 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.

2.1.2 Obvod pro měření

V našem případě je jako obvod pro měření použit dělič napětí. Velmi krátce trvající přechodové děje, např.: 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.

2.2 Kompletní zkušební obvod

V této kapitole je popsán již kompletní zkušební obvod pro impulzní zkoušku včetně zkušebního objektu.



Obr. 7. Typický obvod pro impulzní zkoušku [5]

Legenda:

1	impulzní generátor	C_g	kapacita generátoru
2	usekávací jiskřiště	C_L	zatěžovací kapacita
3	hlavní obvod	C_t	efektivní kapacita
4	usekávací obvod	L_t	efektivní impedance
5	zkoušený obvod	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) vysokonapěťové části děliče napětí

$Z_2(C_2)$ impedance (kapacita) nízkonapěťové části děliče napětí

2.3 Parametry ovlivňující tvar impulzu

V předešlé kapitole 2.1 jsme popsali princip zkušebního obvodu a zejména vznik rázového impulzu, který generuje rázový generátor. V kapitole 2.2 je vidět na obr. 7 kompletní schéma zkušebního obvodu. Na tyto kapitoly plynule navážeme parametry, které ovlivňují dobu čela a dobu půltýlu rázové vlny vytvořené rázovým generátorem a taktéž jakými impulzy můžeme zkoušet zařízení.

2.3.1 Normalizovaný atmosférický impulz

Normalizovaný atmosférický impulz je plný atmosférický impulz s dobou čela 1,2μs a dobou půltýlu 50μs. Označuje se jako impulz 1,2/50 a je znázorněn na obr. 8.

Tolerance

Není-li jinak stanoveno příslušnou Technickou komisí, akceptují se následující rozdíly mezi stanovenými hodnotami pro normalizovaný impulz a skutečně zaznamenaných impulzů.

- vrcholová hodnota ± 3%
- doba čela ± 30%
- doba půltýlu ± 20%

Useknutý atmosférický impuls

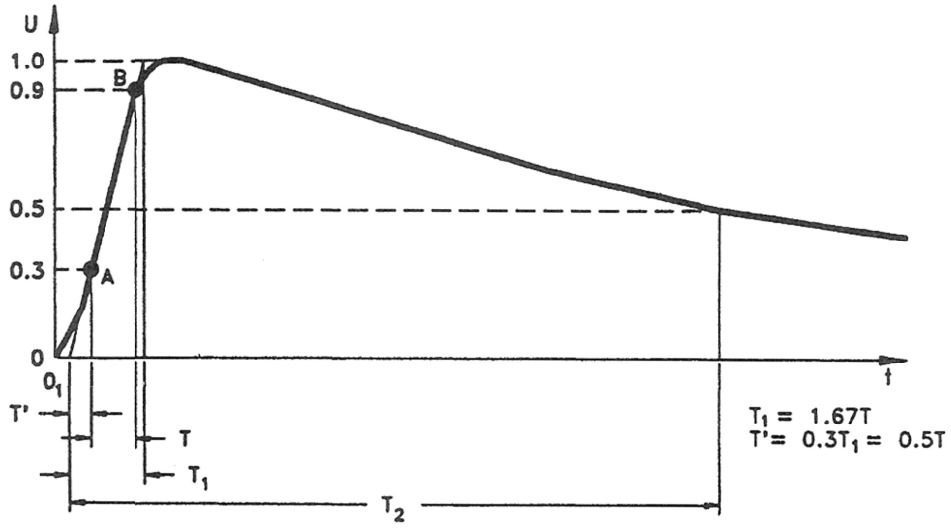
Normalizovaný useknutý atmosférický impulz je normalizovaný impulz useknutý vnějším jiskřištěm po 2 - 5μs. Příslušná Technická komise může stanovit jinou dobu useknutí. Vzhledem k praktické obtížnosti měření nebylo trvání napěťového poklesu normalizováno.

Zvláštní atmosférický impuls

V některých případech se mohou použít oscilační atmosférické impulzy s kratší dobou čela nebo vrcholovými hodnotami odpovídajícími činiteli využití generátoru většímu než 1.

Zdroj zkušebního napětí

Impulz se obvykle vytváří impulzním generátorem, který je popsán v kapitole 2.1.1.



Obr. 8. Plný atmosférický impuls [6]

2.3.2 Tvary vln

Hodnoty předepsaných tvarů impulzů nemusí být vždy dosažitelné. Při impulzních zkouškách prováděných na velkých výkonových transformátorech a tlumivkách s nízkou indukčností vinutí anebo 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 a zároveň vlna vyhovovala, respektovala normu IEC 60060-1. V případech velkých výkonových vinutí a obzvláště v případech vinutí středního a nižšího napětí nemusí být dosažitelná skutečná doba půltýlu 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. 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. V případě, že je průběh vlny z důvodů extrémně nízké indukčnosti anebo malé kapacity impulzního generátoru oscilační, neměla by amplituda

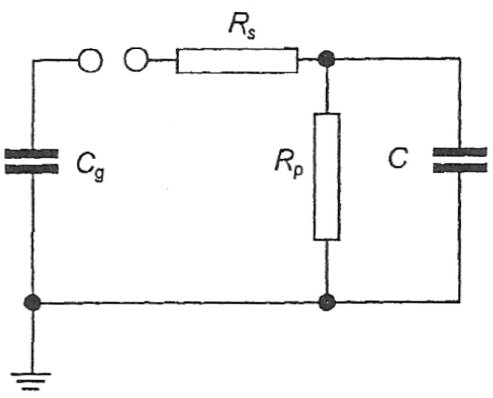
opačné polarity přesáhnout 50% vrcholové hodnoty první amplitudy. V následující kapitole je uveden postup na volbu kapacity impulzního generátoru a nastavení tvaru vlny.

2.3.3 Princip ovlivňování tvaru vlny

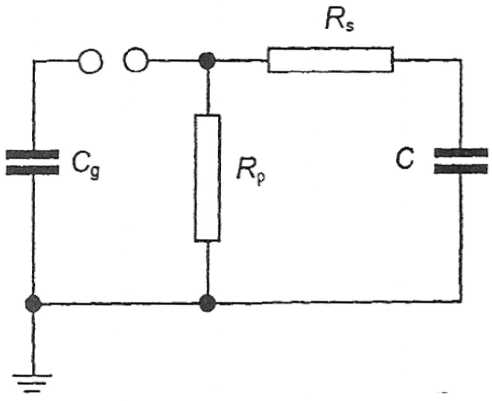
Generování impulzů je založeno na principu nabití skupiny paralelně zapojených kondenzátorů a jejich následném vybití v sérii. Velikost napětí je určena počátečním nabíjecím napětím, počtem kondenzátorů v sérii při vybití a regulací obvodu. Tvar vlny je určen převážně kapacitami a odpory generátoru a impedancí zátěže. Zásady pro ovlivňování tvaru vlny při zkouškách transformátorů atmosférických impulzem jsou ukázány na zjednodušených schématech uvedených na obrázcích 9 a 10. Tato schémata je nutné rozdělit do dvou hlavních skupin:

- pro vysokoimpedanční vinutí;
- pro nízkoimpedanční vinutí;

● Vysokoimpedanční vinutí (L_t > 100 mH)



Obr. 9. Parametry ovlivňující tvar vlny [4]



Obr. 10. Parametry ovlivňující tvar vlny [4]

Legenda:

C_g	kapacita generátoru
$C = C_t + C_L + C_1$	(viz obr. 9)
$R_s = R_{si} + R_{se}$	celkový sériový odpor (viz obr. 9)
R_p	paralelní odpor (viz obr. 9)

Doba čela je dána:

$$T_1 = 3 \cdot \frac{R_S R_p}{R_S + R_p} \cdot \frac{C_g C}{C_g + C} \qquad \text{(obrázek 9)} \qquad (2.4)$$

$$T_1 = 3 \cdot R_S \cdot \frac{C_g C}{C_g + C} \qquad \text{(obrázek 10)} \qquad (2.5)$$

Doba půltýlu je dána:

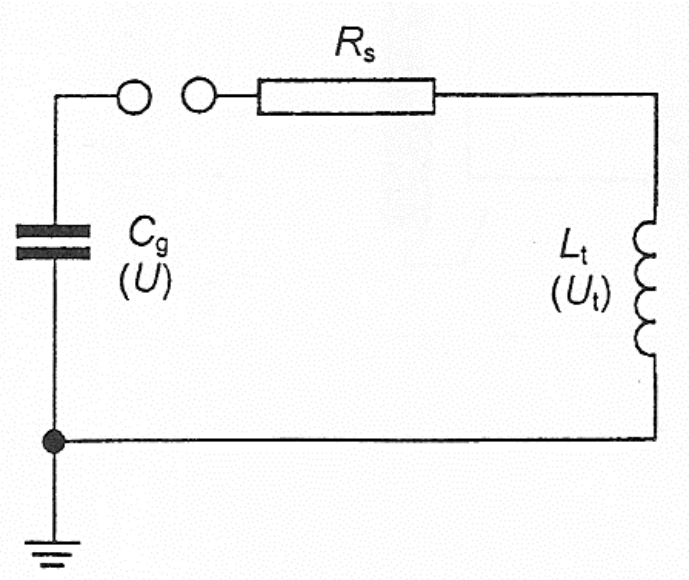
$$T_2 = 0{,}7(R_S + R_P)(C_g + C) \qquad \text{(obrázek 9)} \qquad (2.6)$$

$$T_2 = 0{,}7R_P(C_g + C) \qquad \text{(obrázek 10)} \qquad (2.7)$$

Parametry čela a týlu jsou obecně upravovány v souladu s principy použitelnými pro čistě kapacitní zátěže. Mělo by být zdůrazněno, že efektivní kapacita transformátoru C_t, zapracována v hodnotě C, z pohledu týlu a čela je rozdílnou fyzikální veličinou. Hodnota doby čela C_t může být vypočtena jako $C_t = C_B + \sqrt{(C_s C_e)}$, kde C_B představuje kapacitu průchodky, C_s je sériová kapacita vinutí a C_e je kapacita vinutí proti zemi.

● 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 obrázku 11.



Obr. 11. Parametry ovlivňující tvar vlny u nízkoimpedančního vinutí

Zkušební napětí má 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 požívány, protože tyto hodnoty odporů způsobují dlouhé doby čela.

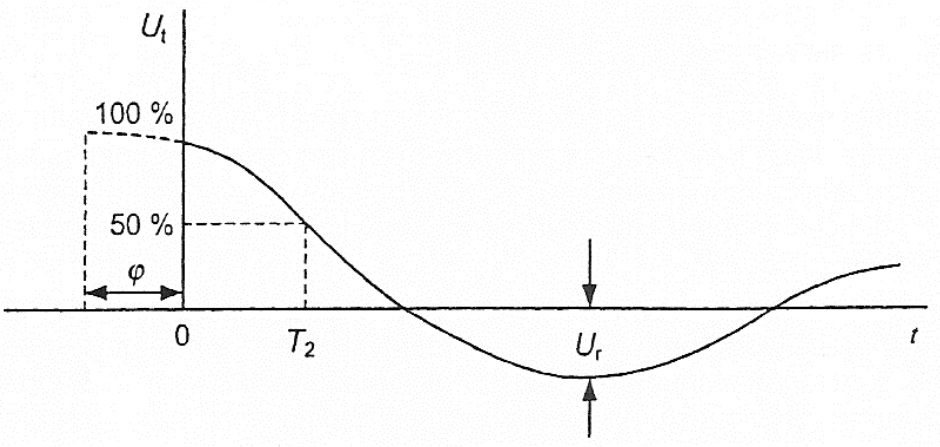
V případě, že k < 1, je zkušební napětí dáno:

$$U_t = Ue^{-\alpha t}\left(cos\omega t - \frac{\alpha}{\omega} sin\omega t\right) = \frac{U}{cos\varphi} e^{-\alpha t} \cos\left(\omega t + \varphi\right) \tag{2.8}$$

kde $\omega^2 = \omega_o^2 - \alpha^2$ $\omega_o^2 = \frac{1}{L_t C_g}$

$\alpha = \frac{R_s}{2L_t}$ $tg\varphi = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{k}{\sqrt{1-k^2}}$

a koeficient útlumu $k = \frac{\alpha}{\omega_o} = \frac{R_s}{2\sqrt{\frac{L_t}{C_g}}}$



Obr. 12. Tlumená oscilace

R_s je uvažováno rovno nule, pro odhad T_2. Pak má rovnice (2.8) tvar: $U_t = U\,cos\omega_0 t$ a doba půltýlu je určena vztahem

$$T_2 = \frac{1}{6} \cdot \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{3}\sqrt{L_t C_g} \tag{2.9}$$

Tento teoretický vztah definuje netlumenou oscilační vlnu se 100% vrcholovou hodnotou opačné polarity. Oscilace s opačnou polaritou, která má tak vysokou hodnotu, může přetěžovat izolaci mezi cívkami nebo mezi závity, které může vyvolat zvýšené elektrodové mechanizmy nebo vznik částečných výbojů způsobené zkušebními nedostatky. Vrcholová

hodnota U_r by měla být z těchto důvodů omezena na 50% počátečná vrcholové hodnoty.

Hodnota L_t je ovlivněna zapojením nezkoušených vinutí. Hodnota L_t představuje rozptylovou indukčnost transformátoru se zkratovanými a uzemněnými nezkoušenými vinutími. Tato konfigurace představuje pro izolaci mezi vinutími nebo částmi vinutí největší namáhání, i s výsledným kratším týlem.

Hodnota C_g se může měnit sériovým nebo paralelním zapojením stupňů impulzního generátoru. Minimální hodnota kapacity generátoru musí být v souladu s rovnicí (3.0)

$$C_g = 2\frac{T_2^2}{L_t} \tag{3.0}$$

Můžou nastat případy, kdy podmínka rovnice (3.0), nemůže být splněna z důvodu extrémně nízkých hodnot L_t nebo tam, kde hodnota L_t nemůže být zvýšena pomocí odporového propojení svorek nezkoušených vinutí proti zemi. Pak je konstanta vybití dána vztahem

$$\tau = \frac{L_t}{R_s} \tag{3.1}$$

Rovnice (3.1) ukazuje další možnost, jak je možné upravit týl vlny. Velké snížení R_s se projeví výrazným překmitem nebo dojde k výskytu superponovaných oscilací ve vrcholu impulzu, a taktéž výrazným překmitem amplitudy do opačné polarity. V těchto případech se doporučuje zapojit přídavnou zatěžovací kapacitu C_L pro ovlivnění tvaru vlny. Tato zatěžovací kapacita omezuje účinky malých sériových rezistorů R_s.

Výše uvedené metody pro ovlivňování vlny nejsou pořád dostačující pro dosažení požadované doby půltýlu, je důležité zvolit kompromis a buď zvolit kratší dobu půltýlu, nebo zvolit uzemnění nezkoušených svorek zkoušeného vinutí přes rezistor.

Při změnách parametrů zkoušeného obvodu, které jsou popsány v kapitole 2.3.3, můžou změnit dobu půltýlu a dobu čela rázového impulzu. Tudíž se musí provádět kalibrace měřeného obvodu společně se zapojeným zkoušeným objektem před každým měřením, aby byla správně nastavena rázová vlna. Tato kalibrace je popsána v následující kapitole 2.4.

2.4 Kalibrace

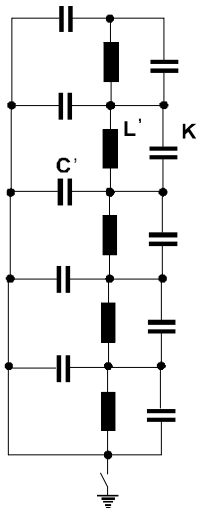
Před zahájením zkoušky by měla být provedena celková kontrola zkušebního obvodu a měřicího obvodu a měřicího systému při napětí nižším než je snížená hladina napětí. V průběhu této kontroly může být napětí měřeno prostřednictvím kulového jiskřiště nebo na základě srovnávacího měření porovnáním s jiným 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 měřícího systému. Po provedení všech kontrol je nezbytné, aby ani měřící ani zkušební obvod nebyl měněn s výjimkou odstranění přístrojů použitých v kontrole. Obvod je kalibrován pro nastavení požadované úrovně napětí a korigován na aktuální podmínky v laboratoři. Cejchuje se kompletní obvod i se zkoušeným objektem pomocí rázu se sníženou amplitudou. [5]

3 Chování transformátoru při zkoušce atmosférickým impulzním napětím a při zkoušce useknutým impulzem

Abych mohl vůbec ověřit chování výkonového transformátoru při zkoušce atmosférickým impulzním napětím, musel jsem nejdřív navrhnout a sestavit model jednopolohové cívky, který je znázorněn na obr. 17. Dále jsem pak naměřené hodnoty zpracoval a následně z nich sestrojil grafy a provedl zhodnocení výsledků.

3.1 Úvod do problematiky

Vinutí transformátoru představuje elektrickou síť, v níž mohou vznikat volné kmity různých frekvencí. Pro základní názor je možno představit si vinutí jako článkový vodič, sestavený z indukčností jednotlivých dílů vinutí L', kapacit těchto elementů k zemi C' a vzájemně mezi sebou K' (obr. 13).



Obr. 13. Náhradní schéma cívky

Při vstupu strmého napěťového impulzu na transformátor nepropouštějí indukčnosti L' v prvém okamžiku proud a transformátor se chová jako řetězec kapacit C' a K'. Rozdělení napětí na takovém řetězci je nerovnoměrné a ukázáno na obr. 14b křivka 1. Toto rozdělení je označováno jako počáteční rozdělení napětí a dá se spočítat podle těchto rovnic:

pro uzemněný konec vinutí $$u_0 = \frac{\sinh \gamma(l-x)}{\sinh \gamma l} \tag{3.2}$$

pro izolovaný konec vinutí $$u_0 = \frac{\sinh \gamma(l-x)}{\cosh \gamma l} \tag{3.3}$$

Nemá-li vstupní impulz pravoúhlé čelo (T_c=0), ale konečnou hodnotu (T_c=t_1), bude proud částečně procházet i indukčností. Křivka rozdělení napětí podél vinutí v okamžiku maxima napětí vstupního impulzu se rovněž nazývá křivkou počátečního rozdělení, ale je položena poněkud blíže k přímce konečného rozdělení napětí, než při impulzu pravoúhlém.

V ustáleném stavu, připojí-li se na transformátor stejnosměrné napětí (nekonečně dlouhý impulz), mohou nastat dva případy:

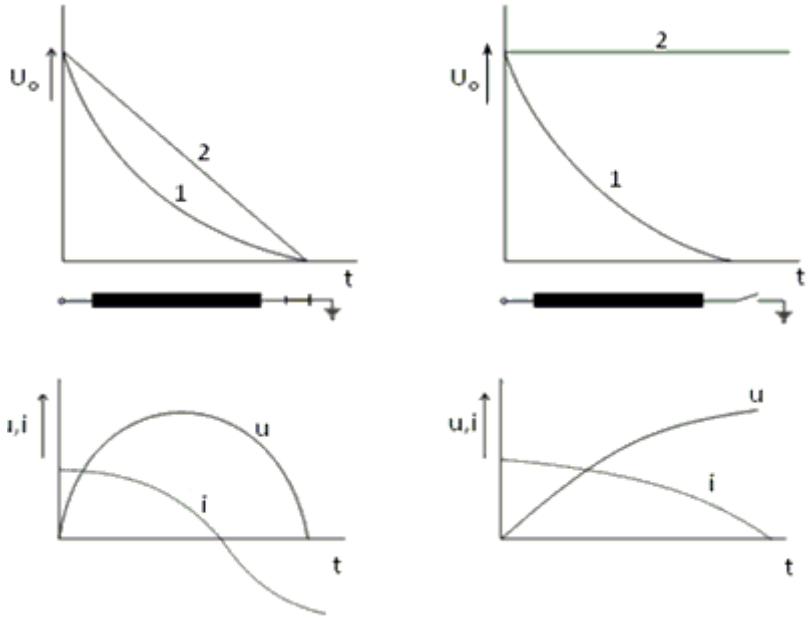
a) nulový bod vinutí není uzemněn (izolovaný nulový bod). V tomto případě bude po celé délce vinutí konstantní napětí rovné napětí vstupnímu (obr. 14b křivka 2).

b) nulový bod vinutí je uzemněn (účinně uzemněný nulový bod). Napětí podél vinutí se rozdělí rovnoměrně od hodnoty rovné vstupnímu k nule za předpokladu, že vinutí je homogenní (obr. 14a křivka 2).

Vzhledem k rozdílu mezi počátečním a konečným rozložením napětí na vinutí transformátoru vznikají volné (vlastní) kmity různých frekvencí, jejichž amplituda klesá s rostoucí frekvencí.

Maximální napětí v různých bodech vinutí transformátoru se určí z volných kmitů, vzniklých vyrovnáváním počátečního a konečného rozložení napětí. Je-li impulz vstupující na transformátor konečný, nemohou potenciály v různých bodech vinutí vzrůst až k maximální velikosti, kterou by měly při nekonečně dlouhém impulzu. Prakticky je třeba k plnému rozvinutí volných kmitů, aby délka přiloženého impulzu byla 2 až 3krát delší než perioda první harmonické volných kmitů.

Perioda první harmonické volných kmitů je dána celkovou kapacitou vinutí k zemi a jeho indukčností. Ta závisí na tom, uzavírá-li se magnetický tok vinutí, na něž se přikládá napětí, vzduchem nebo přes železo. Uzavírá-li se magnetický tok vzduchem, je indukčnost vinutí malá (rozptylová indukčnost). Teče-li magnetický tok železem, je indukčnost velká (indukčnost chodu naprázdno). U velkých výkonových transformátorů je rozptylová indukčnost asi desetinou indukčnosti chodu při jmenovitém zatížení. Je-li napětí přiloženo k primárnímu vinutí (vysokého napětí), potom cesta magnetického toku bude záviset na způsobu zapojení sekundárního (nižšího napětí) a na uzemnění neutrály vinutí prvého. Za jistých zjednodušujících předpokladů lze přijmout následující výklad: při uzemněné neutrále primárního vinutí je rozložení základních harmonických napětí a proudu podél vinutí podle obr. 14a. Napětí má na koncích vinutí uzly (rozdělení podle sinus), protože ani začátek ani konec vinutí nemůže volně kmitat, ale proud má na koncích kmitny (rozdělení podle kosinus).

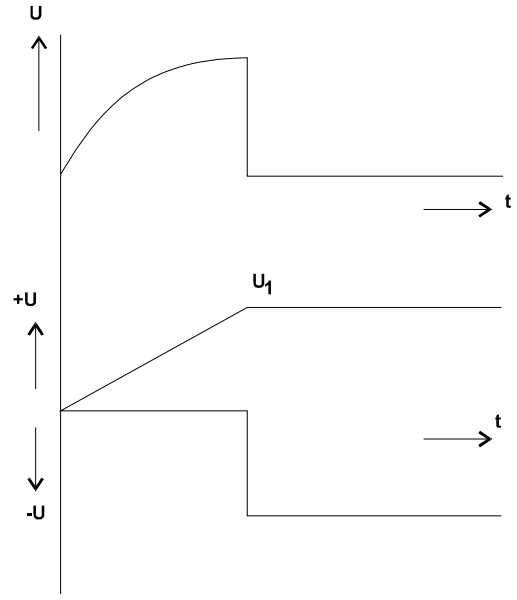


Obr. 14. a) Rozložení napětí podél cívky s uzemněným koncem; b) s izolovaným koncem

Na počátku bylo vysvětleno, že nejnepříznivější počáteční rozdělení napětí vznikne při impulzu s pravoúhlým čelem (T_c=0). Při tom vznikají nejvyšší gradienty. Stejně vysoké gradienty mohou vzniknout také při useknutém impulzu, třebaže měl ploché čelo (obr. 15). Useknutý impulz může vzniknout přeskokem na jiskřišti nebo v provozu např. působením Torokovy trubice. Působení useknutého impulzu je ekvivalentní působení dvou impulzů:

a) impulzu s poměrně plochým čelem U_1,

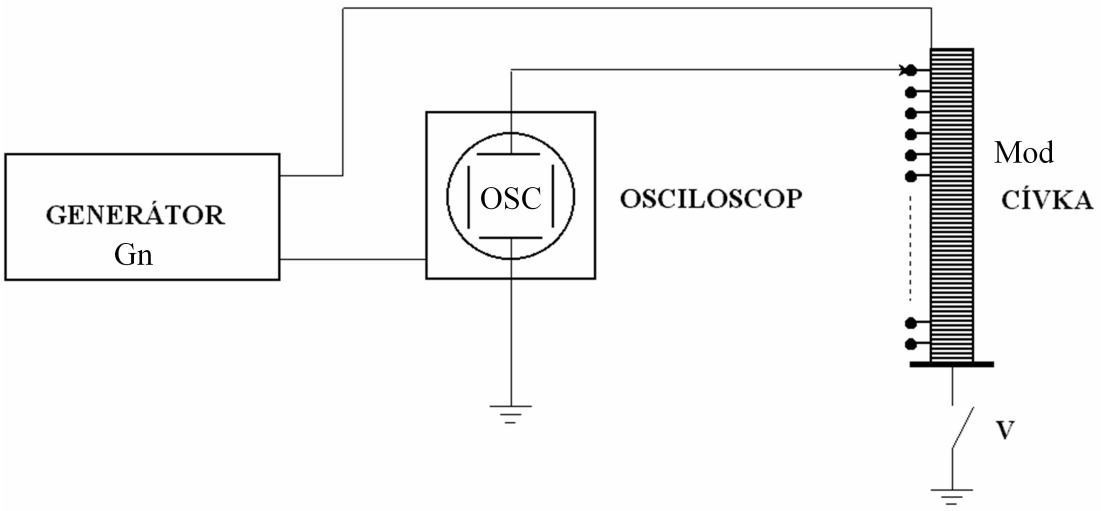
b) impulzu opačné polarity s pravoúhlým čelem U_2.



Obr. 15. Vliv useknutého impulzu

3.2 Měřicí obvod

Výše uvedenou problematiku si ověřím měřením na modelech jednopolohové cívky a lokomotivních cívek transformátoru. Jako zdroj napěťového impulzu použiji funkční generátor. Časové průběhy napětí na jednotlivých odbočkách cívky budu snímat oscilograficky. Vypínač V slouží k modelování izolovaného, či uzemněného konce cívky.



Obr. 16. Schematické zapojení

Použité přístroje:

NÁZEV	OZN.	ÚDAJE	ČÍSLO
Generátor Agilent 33250A	Gn	200-240V; 50-60Hz; 140VA	ZCU 21856
Digitální osciloskop	Osc	LeCroy (wawepro 7300A)	/
Model jednopolohové cívky	Mod1	10x100pF; 10x100pF±20%	ZCU 211
Objekt lokomotivní cívky	Mod2	Max 350VA	/
Počítač	PC	Intel inside Pentium II	/

3.2.1 Ověření elektrického namáhání

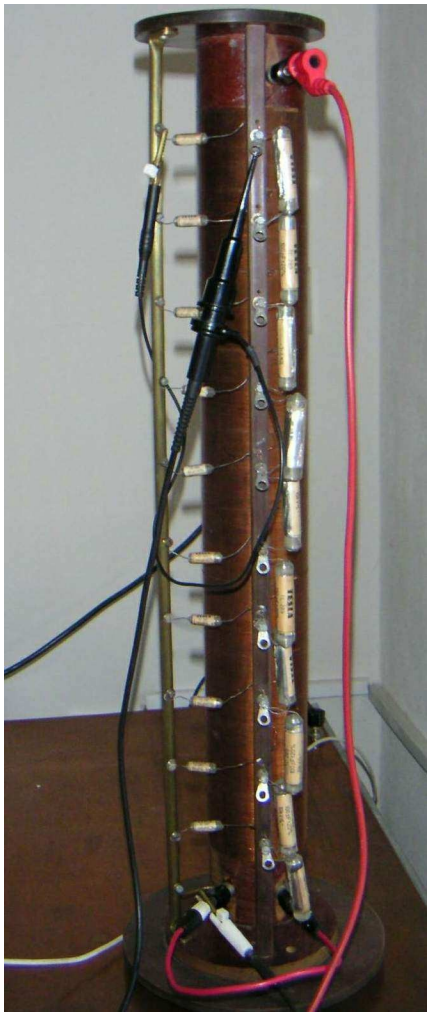
Ověření elektrického namáhání jsem provedl při atmosférickém impulzu nízkého napětí. Při modelovém měření nízkým napětím je podstatný tvar impulzu. Ve skutečnosti však dosahují hodnoty atmosférického impulzu desítek kV.

Pro měření jsem použil funkční generátor obdélníkového impulzu o hodnotě napětí 10V. Toto napětí je přivedeno na vstupy jednotlivých zkušebních vinutí. Jednotlivé měřicí body jsou vyvedeny na měřicí svorky. Měření je prováděno digitálním osciloskopem LeCroy (wawepro 7300A), kde zobrazený průběh je poté přenesen do procesoru Intel inside Pentium II a zaznamenán.

Nejdříve je ale nutno změřit napěťový impulz, který je přiveden na vstupní svorku vinutí. Obraz impulzu se stanoví na rastru obrazovky osciloskopu tak, aby časová souřadnice vrcholu impulzu byla shodná s nulou zvolené stupnice času. Dále se beze změny nastavení osciloskopu změří průběhy na ostatních odbočkách vinutí, aby bylo možné je zobrazit v jednom grafu.

Prvním zkušebním modelem je jednopolohová cívka, která je na obr. 18. Tento model má v jednotlivých částech navíc zapojeny kondenzátory pro zvýraznění podélné i příčné kapacity. Na vstupní svorku tohoto vinutí jsem z generátoru přivedl obdélníkový impulz simulující přechodný děj. Měření jsem provedl pro uzemněný a izolovaný konec vinutí a hodnoty zaznamenal do tabulek tab. 4. a tab. 5. Poté jsem na vstupní svorky přivedl useknutý impulz o délce 3μs a hodnoty zaznamenal do tabulek tab. 6. a tab. 7. Měření jsem rovněž provedl pro uzemněný a izolovaný konec vinutí.

Za druhé jsem prováděl měření na lokomotivních transformátorech s vyvedenými odbočkami vinutí na měřicí svorky. Měřil jsem přímé a prokládané vinutí. U prokládaného vinutí jsem zjistil, že zvlnění jsou nepatrná a blíží se zdrojovému napětí, a proto jsem pro naznačení zaznamenal pouze hodnoty první a poslední odbočky, kde by měla být amplituda kmitů nejvyšší, protože vinutí nebylo uzemněno.



Obr. 17. Jednopolohová cívka

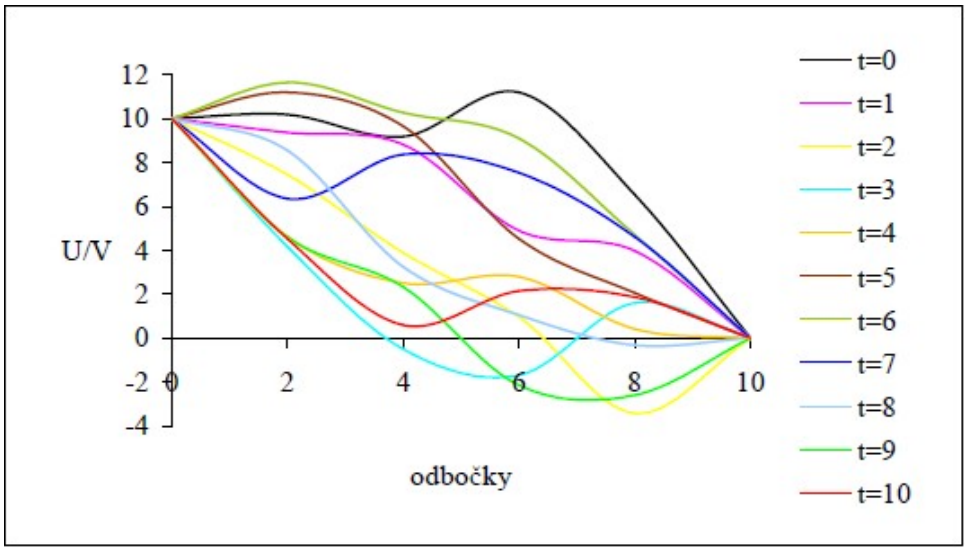
Všechny naměřené hodnoty byly exportovány z digitálního osciloskopu do počítače, kde jsem data zpracoval a uložil pomocí softwarového vybavení pro digitální osciloskopy. Časové průběhy z naměřených hodnot napětí jsou v tabulkovém procesoru MS Excel a uvedeny v kapitole 3.3.

3.3 Vlastnosti vinutí při rázovém namáhání

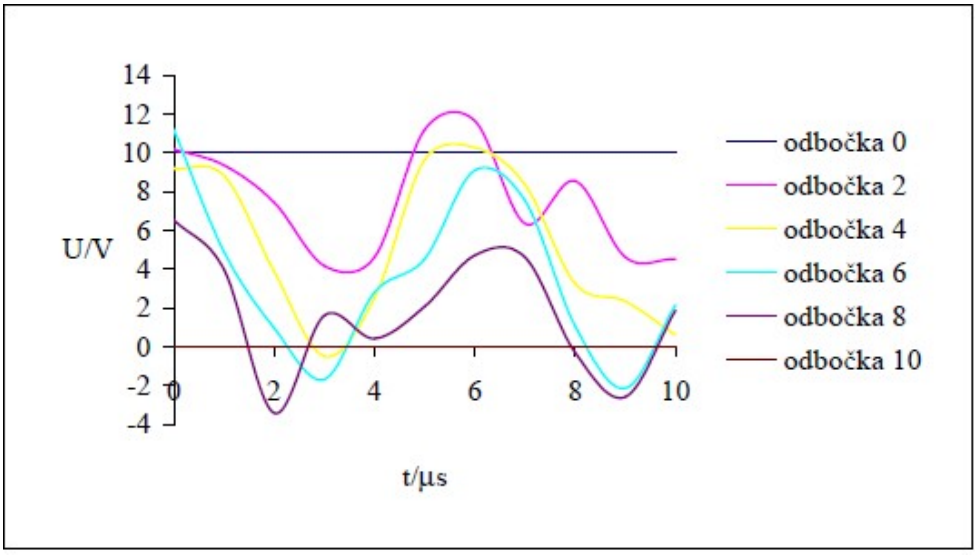
3.3.1 Měření modelu jednopolohové cívky

K	U/V v čase t=10µs										
	0µs	1µs	2µs	3µs	4µs	5µs	6µs	7µs	8µs	9µs	10µs
0	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
2	10,18	9,36	7,44	4,16	4,61	11,19	11,64	6,35	8,54	4,61	4,52
4	9,18	8,81	3,88	-0,50	2,51	9,64	10,27	8,36	3,24	2,33	0,59
6	11,19	4,89	0,96	-1,69	2,79	4,52	9,09	7,53	1,05	-2,15	2,15
8	6,53	3,97	-3,42	1,60	0,41	2,06	4,70	4,61	-0,32	-2,60	1,87
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tab. 4. Záznam naměřených hodnot jednopolohové cívky s uzemněným koncem pro t=10µs



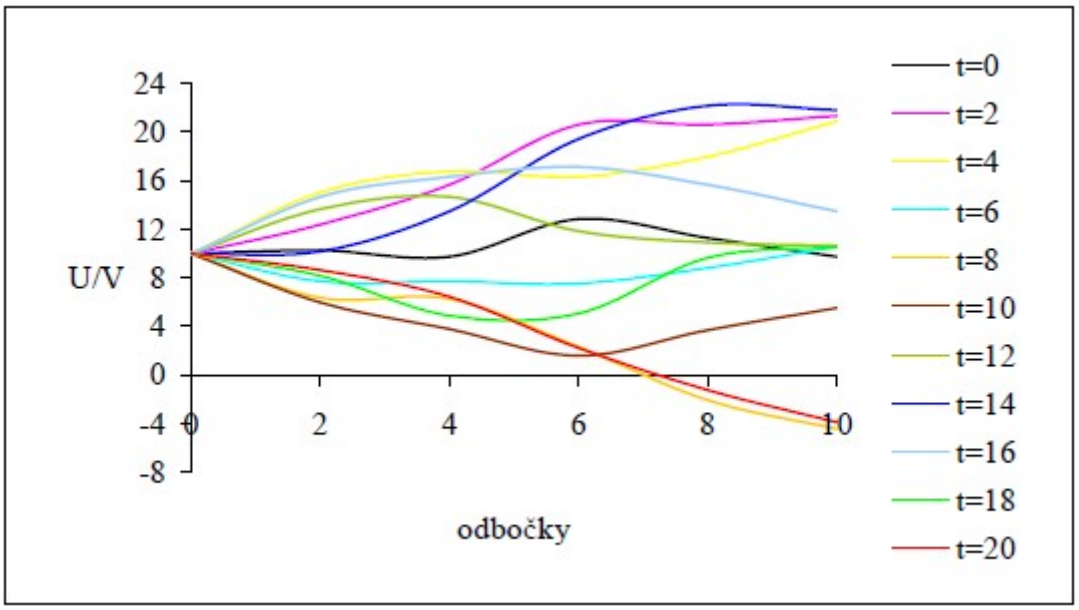
Obr. 18. Rozložení napětí podél vinutí s uzemněným koncem pro různé časy (v legendě uvedeny časy v µs)



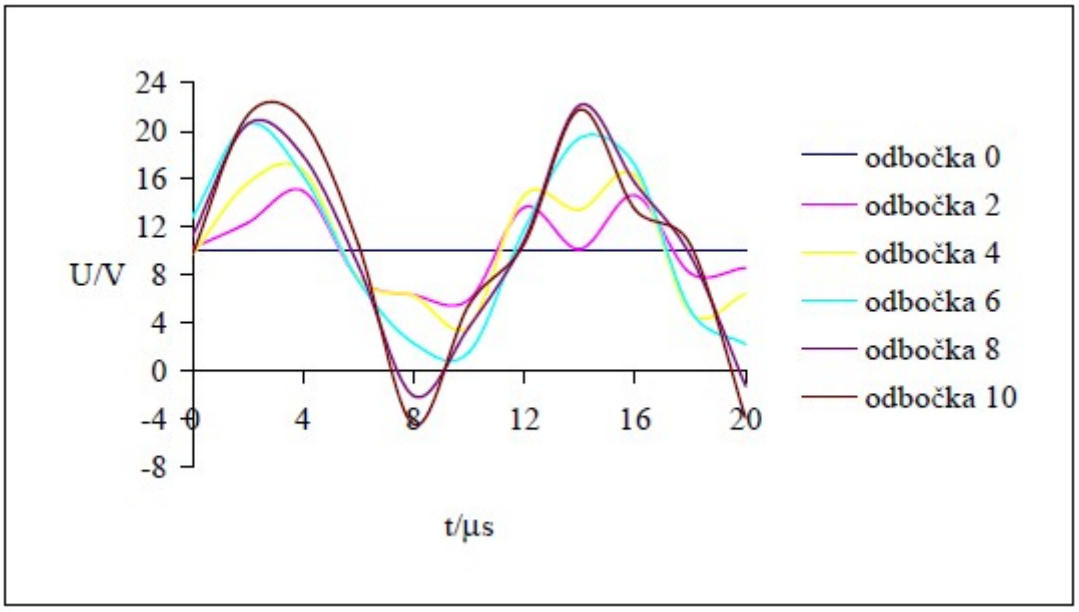
Obr. 19. Časové průběhy napětí v různých místech vinutí s uzemněným koncem

K	U/V v čase t=20µs										
	0µs	2µs	4µs	6µs	8µs	10µs	12µs	14µs	16µs	18µs	20µs
0	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
2	10,27	12,37	15,02	7,72	6,35	5,98	13,65	10,18	14,66	8,17	8,63
4	9,73	15,66	16,76	7,72	6,26	3,79	14,66	13,47	16,30	4,89	6,44
6	12,83	20,59	16,30	7,53	2,33	1,60	11,83	19,41	17,12	5,07	2,24
8	11,28	20,59	17,94	8,81	-2,05	3,70	10,91	22,15	15,66	9,64	-1,23
10	9,73	21,32	20,87	10,55	-4,43	5,53	10,64	21,78	13,47	10,55	-3,88

Tab. 5. Záznam naměřených hodnot jednopolohové cívky s izolovaným koncem v čase t=20µs



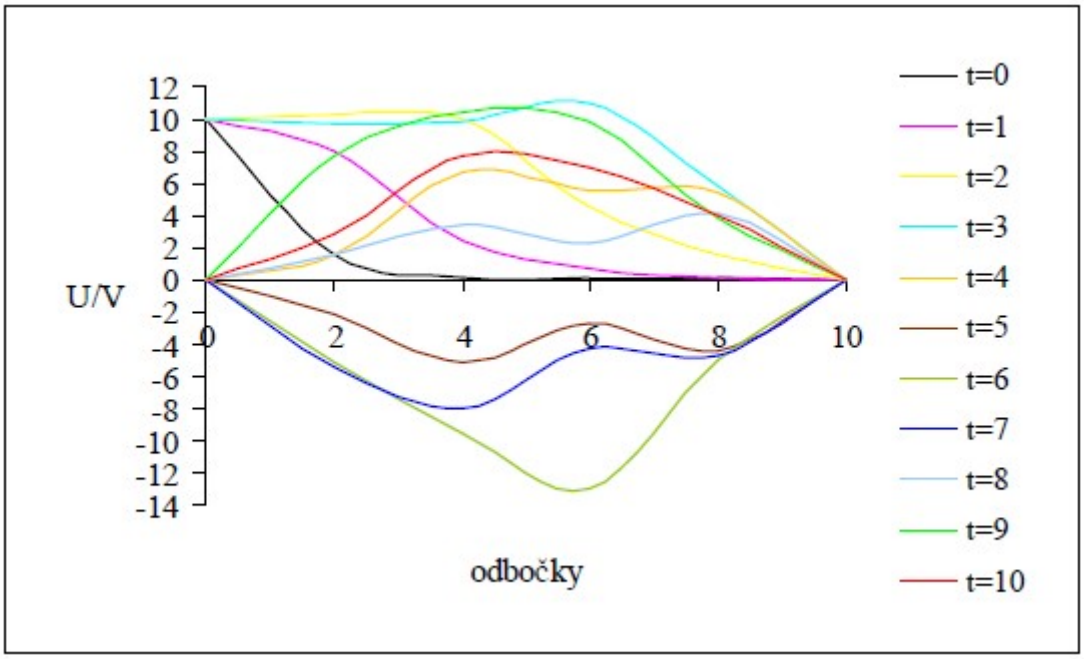
Obr. 20. Rozložení napětí podél vinutí s izolovaným koncem pro různé časy
(v legendě uvedeny časy v µs)



Obr. 21. Časové průběhy napětí v různých místech vinutí s izolovaným koncem

K	U/V v čase t=10μs										
	0μs	1μs	2μs	3μs	4μs	5μs	6μs	7μs	8μs	9μs	10μs
0	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1,64	8,05	10,22	9,75	1,55	-2,11	-5,12	-5,40	1,64	7,66	2,92
4	0,18	2,46	9,95	9,86	6,75	-5,21	-9,60	-8,04	3,37	10,40	7,75
6	0,18	0,72	4,56	10,95	5,56	-2,75	-13,07	-4,30	2,28	9,86	6,93
8	0,08	0,18	1,64	5,84	5,47	-4,48	-5,03	-4,66	4,10	3,92	4,01
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

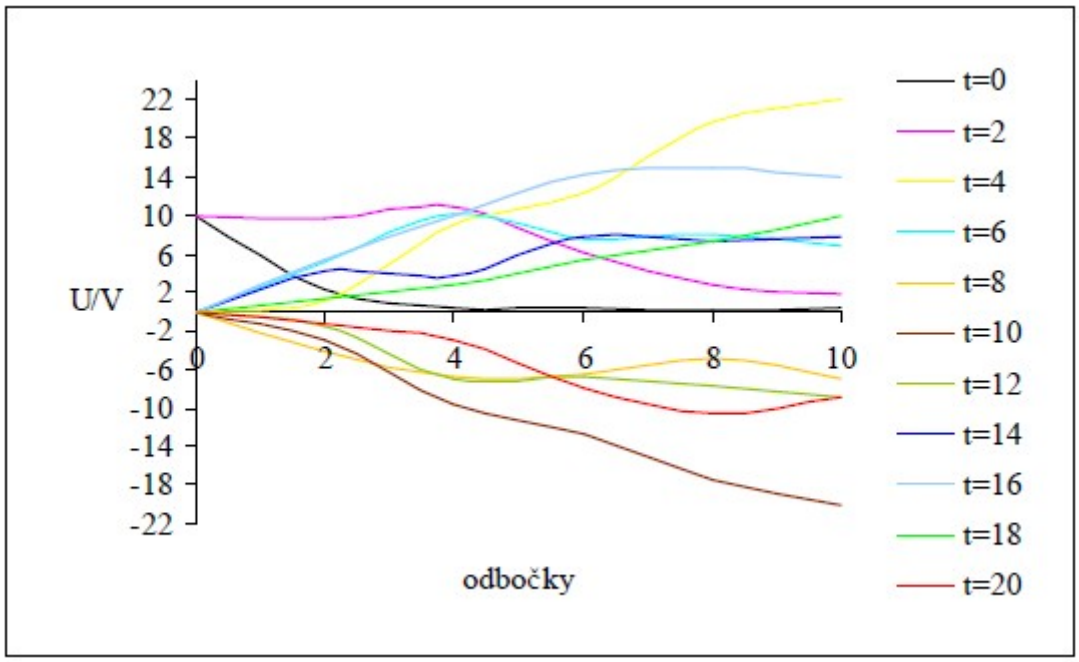
Tab. 6. Záznam naměřených hodnot jednopolohové cívky s uzemněným koncem v čase t=10μs po přivedení useknutého impulzu o délce 3μs



Obr. 22. Rozložení napětí podél vinutí s uzemněným koncem pro různé časy po přivedení useknutého impulzu o délce 3μs (v legendě uvedeny časy v μs)

K	U/V v čase t=20μs										
	0μs	2μs	4μs	6μs	8μs	10μs	12μs	14μs	16μs	18μs	20μs
0	10,00	10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2,20	9,70	1,10	5,10	-4,20	-2,90	-1,60	4,20	5,50	1,30	-1,30
4	0,50	11,00	8,90	10,20	-6,80	-9,70	-6,90	3,80	9,90	2,70	-2,90
6	0,40	6,20	12,40	7,50	-6,60	-12,60	-6,80	7,90	14,20	5,50	-8,00
8	0,20	2,90	19,70	8,00	-4,90	-17,40	-7,70	7,30	15,00	7,30	-10,60
10	0,40	1,80	22,10	6,80	-7,10	-20,10	-8,80	7,70	14,10	10,00	-8,80

Tab. 7. Záznam naměřených hodnot jednopolohé cívky s izolovaným koncem v čase t=20μs po přivedení useknutého impulzu o délce 3μs



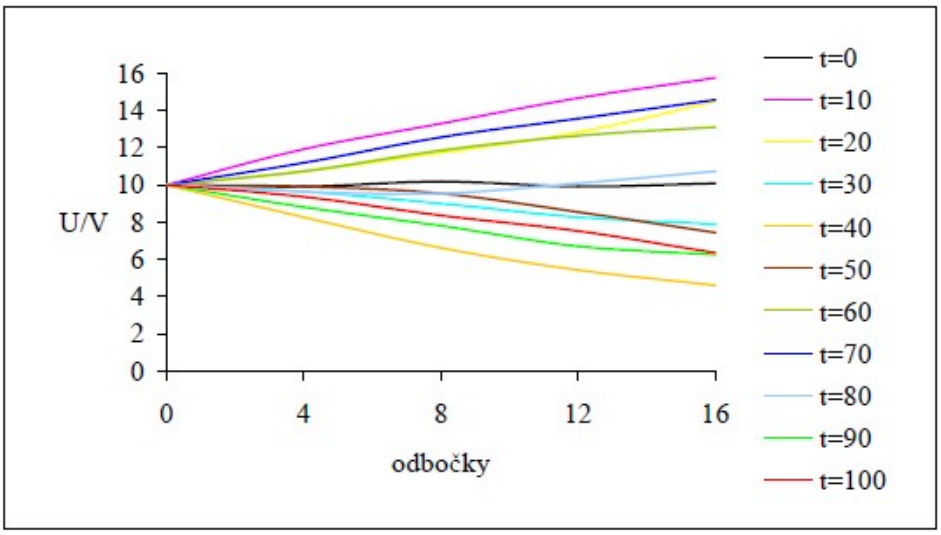
Obr. 23. Rozložení napětí podél vinutí s izolovaným koncem pro různé časy po přivedení useknutého impulzu o délce 3μs (v legendě uvedeny časy v μs)

3.3.2 Měření lokomotivních cívek

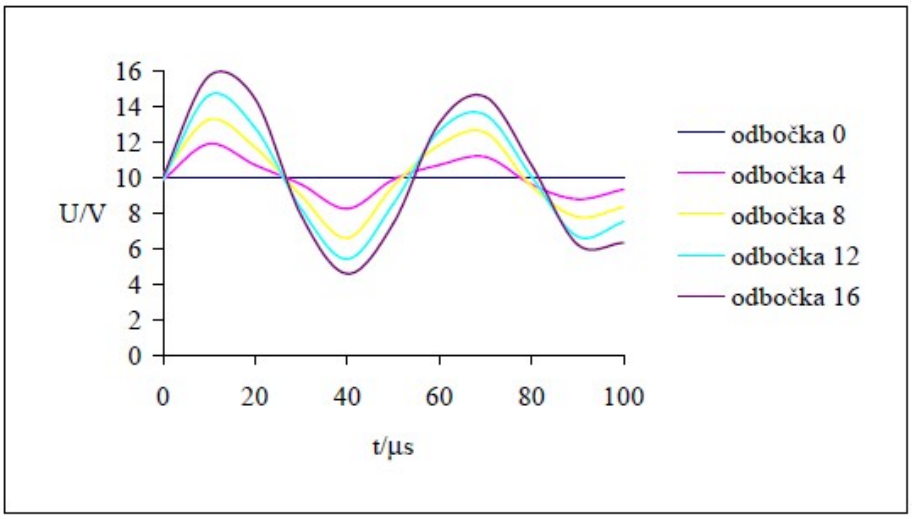
Přímé vinutí

K	U/V v čase t=100μs										
	0μs	10μs	20μs	30μs	40μs	50μs	60μs	70μs	80μs	90μs	100μs
0	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
4	9,91	11,92	10,73	9,64	8,27	9,91	10,73	11,19	9,64	8,81	9,36
8	10,18	13,29	11,73	9,00	6,62	9,54	11,85	12,56	9,54	7,81	8,36
12	9,91	14,66	12,83	8,27	5,43	8,54	12,65	13,56	10,09	6,71	7,53
16	10,09	15,75	14,47	7,90	4,61	7,44	13,10	14,57	10,73	6,26	6,35

Tab. 8. Záznam naměřených hodnot přímého vinutí lokomotivní cívky s izolovaným koncem v čase t=100μs



Obr. 24. Rozložení napětí podél přímého vinutí s izolovaným koncem pro různé časy (v legendě uvedeny časy v μs)



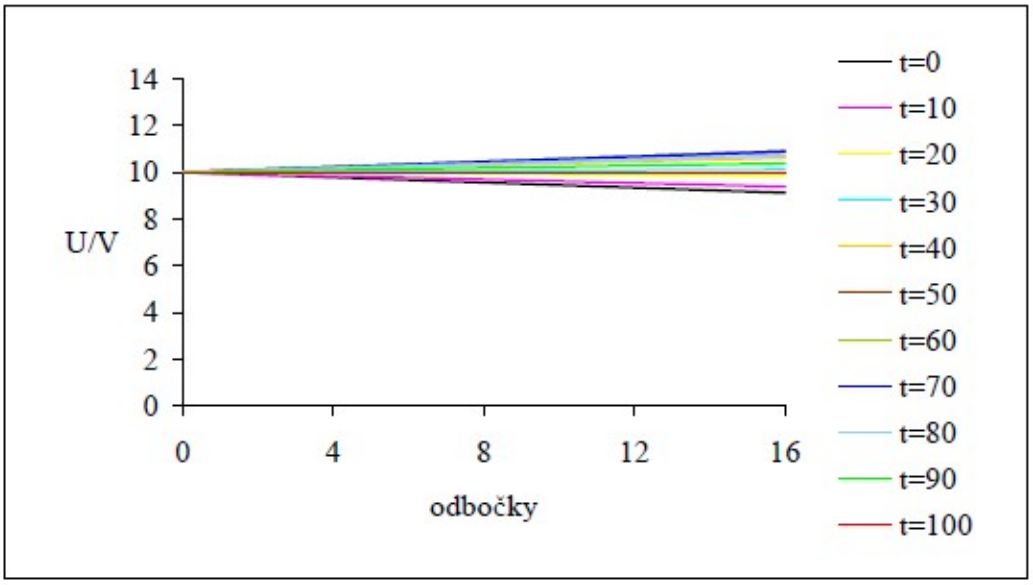
Obr. 25. Časové průběhy napětí v různých místech přímého vinutí s izolovaným koncem

Prokládané vinutí

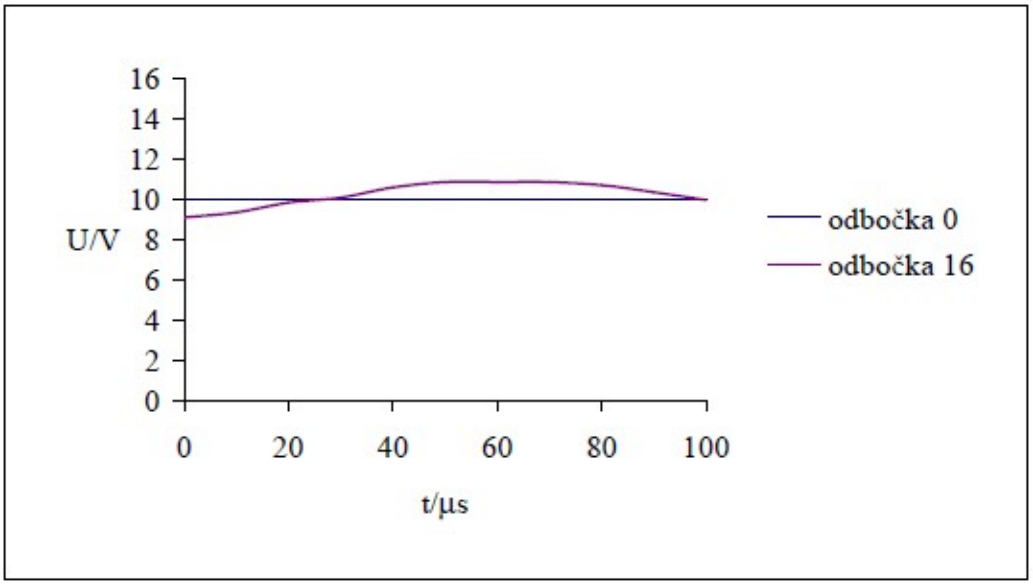
Měřeno pouze pro nultou a šestnáctou odbočku

K	U/V v čase t=100µs										
	0µs	10µs	20µs	30µs	40µs	50µs	60µs	70µs	80µs	90µs	100µs
0	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
16	9,12	9,38	9,87	10,11	10,62	10,89	10,89	10,89	10,73	10,38	10,00

Tab. 9 : Záznam naměřených hodnot prokládaného vinutí lokomotivní cívky s izolovaným koncem v čase t=100µs



Obr. 26 : Rozložení napětí podél prokládaného vinutí s izolovaným koncem pro různé časy (v legendě uvedeny časy v µs)



Obr. 27. Časové průběhy napětí v různých místech prokládaného vinutí s izolovaným koncem

3.4 Výsledky a jejich zhodnocení

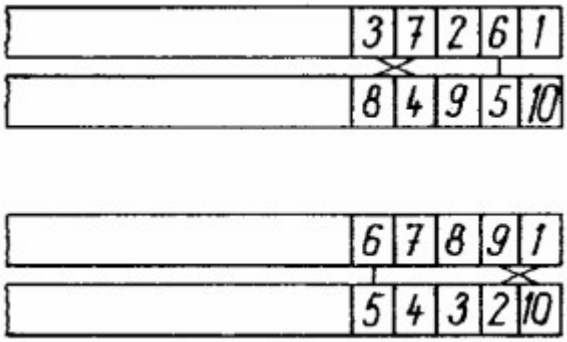
Pro spolehlivý chod transformátorů je třeba jednak zajistit, aby na vinutí nepůsobil impulz o vyšší vrcholové hodnotě, než je přípustná mez pro izolaci. Za další je nutno, aby se počáteční rozložení napětí podél vinutí co nejvíce blížilo rozložení konečnému, tím se omezí nežádoucí účinky jako je nárůst napěťového namáhání mezi závity a cívkami vinutí způsobené volnými kmity při přechodném ději. Kompenzaci kmitání vinutí můžeme omezit lineárním rozložením napětí.

Pro splnění první podmínky se vedení jistí zemnícími lany a celé elektrizační soustavy se vybavují svodiči přepětí, které chrání transformátor před impulzy, jejichž napětí je vyšší, než je elektrická pevnost izolace transformátoru.

Splnění druhé podmínky je již obtížnější. Vyžaduje daleko složitější konstrukci a technologii výroby vinutí.

3.4.1 Prokládaná vinutí

V praxi se pro potlačení volných kmitů nejčastěji používá prokládání závitů. Tímto způsobem se mění polohy jednotlivých vodičů ve vinutí a dosáhne se tak zvýšení podélných mezizávitových kapacit. Dochází tím k lineárnímu rozložení počátečního napětí podél celého vinutí. Prokládané vinutí je složené ze závitů dvou deskových cívek, které jsou navinuty dvěma paralelními vodiči. Vodiče jsou pak vzájemně kříženy, jak je naznačeno na obr. 28.



Obr. 28. Dva případy prokládání závitů podle připojených číslic

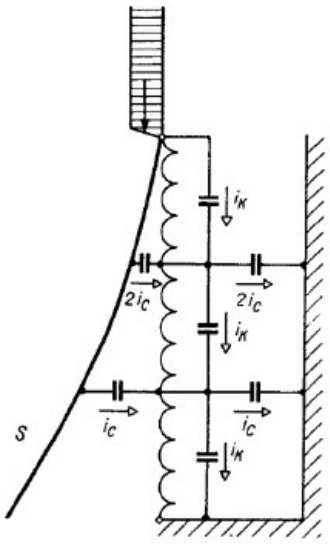
Dvoudesky mohou být také vinuty z více paralelních vodičů a může být provedeno složitější prostřídání jednotlivých vodičů. Prokládání vodičů může být buď ve všech cívkách vinutí, nebo se prokládání může provést jen ve vstupních cívkách, kde je namáhání mezizávitové izolace a izolace k zemi nejnepříznivější

V reálu se prokládání také může provést v průběhu přímého vinutí. Záleží na uvážení konstruktéra, který je informován o provozních parametrech stroje a navrhne vinutí tak, aby docházelo k potlačení nebo k úplnému odstranění volných kmitů.

Při normálních provozních poměrech je nevýhoda těchto úprav vinutí ta, že mezizávitová izolace je mnohem více namáhána a také tento způsob vinutí je konstrukčně náročný. Přesto však je tato úprava vinutí proti negativním vlivům atmosférických přepětí stále častěji používaná.

3.4.2 Kompenzace kapacit proti zemi

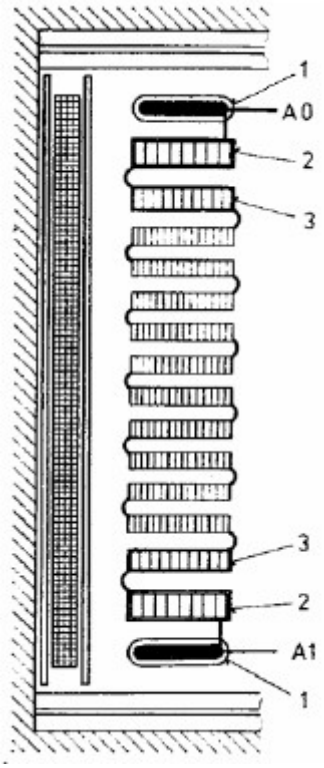
Kompenzace kapacit proti zemi je založena na použití kovového stínidla, tzv. kapacitního štítu. Tento štít kompenzuje kapacitní proudy proti zemi. Na obr. 29 je schematicky znázorněno vinutí s uzemněným koncem a s kapacitním štítem S. Jsou zde také vyznačeny kapacitní proudy v okamžiku příchodu rázu na vstupní svorky vinutí. Předpokládá se, že kapacitní štít úplně kompenzuje kapacitní proudy k zemi, takže počáteční rozložení napětí klesá podle přímky jako rozložení konečné. Kapacitní proudy k zemi (i_c, $2i_c$) jsou na obrázku soustředěny v třetinách vinutí. Mezizávitovými kapacitami prochází stejný proud i_k. Stínit celé vinutí by bylo konstrukčně komplikované a docházelo by tak ke zvětšování rozměrů stroje. Stíní se jen část vinutí na vstupu, které většinou bývají nejvíce přetěžovány.



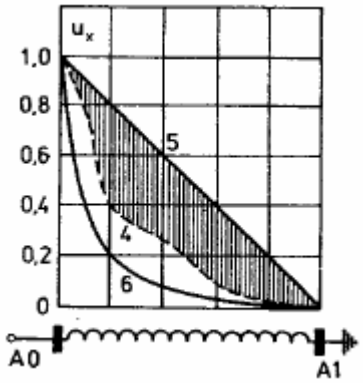
Obr. 29. Vinutí s uzemněným koncem a kapacitním štítem

Kapacitní štít tvoří také kapacitní prstenec, který se uspořádá nad vstupní cívkou a připojí se ke vstupní svorce. Použití kapacitního prstence jsem znázornil na obr. 30.

Nejjednodušším prostředkem pro zajištění rovnoměrného rozložení počátečního napětí a jeho sblížení s konečným rozložením je použití kapacitních prstenců. Rozložení napětí s kapacitním prstencem je na obr. 31. Tyto prstence tvoří kapacitní stínění ve tvaru neuzavřeného mezikruží. Vyrovnávají elektrické pole u konců vinutí, zrovnoměrňují průběh počátečního rozložení napětí a tím ho přibližují k průběhu konečného rozložení.



Obr. 30. Vinutí s kapacitním prstencem

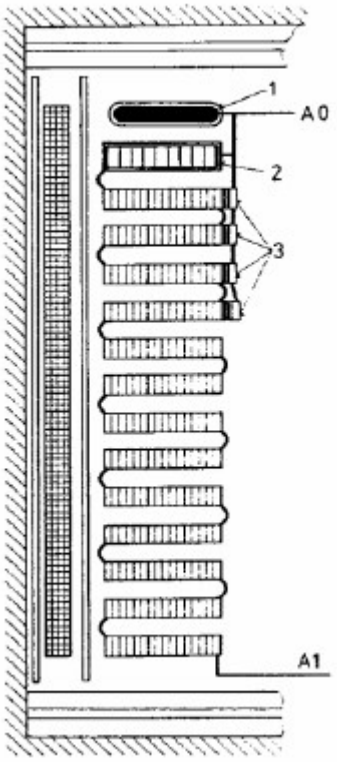


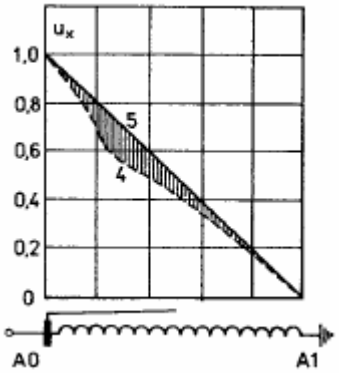
Obr. 31. Rozložení napětí proti zemi ve vinutí s kapacitním prstencem a uzemněným koncem vinutí

Legenda:

1 … kapacitní prstenec
2 a 3 … cívky se zesílenou izolací
4 … počáteční rozložení napětí
5 … konečné rozložení napětí
6 … počáteční rozložení napětí ve vinutí bez kapacitního prstence

Dalšího sblížení počátečního a konečného rozložení napětí (za předpokladu, že jeden konec vinutí je uzemněn) můžeme dosáhnout použitím dalších elektrostatických stínítek ve tvaru neuzavřených kovových prstenců (závitů) pro několik prvních cívek vinutí a spojených se síťovým vývodem vinutí (obr. 32). Při tomto rozložení stínítek se zvýší potenciál prvních cívek, vinutí, spojených se stínítkem kapacit Ce, takže průběh počátečního rozložení napětí se značně vyrovná, jak je vidět na obr. 33.





Obr. 33. Rozložení napětí proti zemi ve vinutí s elektrostatickými stínítky

Obr. 32. Vinutí s elektrostatickými stínítky několika prvních cívek

Legenda:

1 … kapacitní prstenec
2 … cívky se zesílenou izolací
3 … elektrostatická stínítka
4 … počáteční rozdělení napětí
5 … konečné rozdělení napětí

4 Zkušební postupy a vyhodnocení záznamu

4.1 Zkoušky atmosférickým impulzem

4.1.1 Zkušební postupy

Odpovídající zkušební postupy pro zkoušky plným impulzem nebo pro zkoušky useknutým impulzem jsou uvedeny v IEC 60076-3.

Upřednostňovanou zkušební metodou je přímé přiložení napětí, i když ve zvláštních případech, kdy vinutí středního nebo nižšího napětí nemůže být v provozu vystaveno atmosférickým přepětím šířícím se ze systému, ke kterému je toto vinutí připojeno, může být alternativně použita metoda „přeneseného rázu “. Impulzní zkouška nízkonapěťového vinutí je pak provedena současně se zkouškou přidruženého vinutí vyššího napětí. Za těchto podmínek tvar vlny přeneseného napětí neodpovídá požadavkům na tvar vlny uvedeným v IEC 60076-3. Je důležitější pokusit se dosáhnout požadované napěťové hladiny pomocí závěrných rezistorů s nejvyšší odporovou hodnotou. Při této zkoušce se mohou vyskytnout velká mezifázová napětí při zapojení vinutí do trojúhelníku, čímž může vzniknout nebezpečí přetížení mezifázové izolace, vnitřní nebo vnější, což může mít za následek omezení napětí, které může být přivedeno na nízkonapěťové vinutí. Příslušná omezení mohou být stanovena provedením analýzy přechodných jevů použitím nízkonapěťového rázového generátoru.

Vzhledem k vlastnostem nelineárních ochranných zařízení připojených paralelně k vinutím mohou tyto způsobit rozdíly mezi oscilogramy nebo digitální záznamy plného impulzu se sníženou hladinou a plného impulzu s plnou hladinou. Potvrzení, že jsou tyto rozdíly skutečně způsobeny činností těchto zařízení, by mělo být prokázáno provedením dvou nebo více zkoušek použitím impulzu se sníženou hladinou při rozdílných hladinách napětí, aby byl prokázán trend jejich činností. Pro prokázání reverzibility nelineárních vlivů by po plném impulzu na zkušební hladině napětí měly následovat stejné impulzy se sníženou hladinou v opačném pořadí.

Příklad: 60% 80% 100% 80% 60%

Zkušební postupy pro svorky N transformátorů jsou uvedeny v IEC 60076-3. V případě použití nepřímé metody, tzn. impulzem přeneseným do svorky N z jedné nebo více fázových svorek, nemůže být předepsán tvar vlny, přestože ten je v podstatě určen parametry transformátorů. Přímá metoda, zahrnující přiložení napětí na svorku N, přičemž jsou všechny fázové svorky uzemněny, povoluje delší dobu čela vlny, až do 13μs. V tomto případě dojde

k výraznému zvýšení induktivního zatížení generátoru a může být obtížné dosáhnout předepsaných tolerancí doby půltýlu. Potom může být použito uzemnění nezkoušených svorek zkoušeného vinutí přes impedanci. [5]

- **Zapojení při zkouškách na fázových svorkách**

Sled zkušebních impulzů se přikládá postupně na každou z fázových svorek zkoušeného vinutí. U trojfázového transformátoru musí být ostatní fázové svorky vinutí uzemněny přímo nebo přes malou impedanci, o maximální hodnotě vlnové impedance vedení. Má-li vinutí N svorku, musí být střed uzemněn přímo nebo přes malou impedanci a nádoba musí být uzemněna. U transformátorů s odděleným vinutím jsou svorky nezkoušeného vinutí rovněž uzemněny přímo nebo přes impedanci tak, aby napětí vznikající na svorkách bylo omezeno na 75% výdržného napětí u vinutí zapojených do hvězdy a na 50% u vinutí zapojených to trojúhelníku. Při zkouškách vinutí s malou impedancí může být nesnadné dosáhnout správného tvaru impulzu na zkoušených svorkách. V tomto případě se musí připustit větší tolerance viz. IEC 60076-3. Je také možné zjednodušit problém uzemněním nezkoušených svorek zkoušené fáze přes rezistory. Hodnota rezistoru se musí volit tak, aby napětí vznikající na svorkách bylo omezeno do 75% jejich jmenovitého výdržného napětí při atmosférickém impulzu na vinutích zapojených do hvězdy a 50% na vinutích zapojených do trojúhelníků. Výjimky z této hlavní metody jsou obsaženy v IEC 60076-3 (zkouška impulzem svorky N, metoda přepětí přeneseného na vinutí nízkého napětí).

4.1.2 Metody vhodné pro detekci poruch

Detekce poruch je obvykle prováděna vyhodnocením oscilografických záznamů nebo nezpracovaných dat digitálních záznamů přiloženého zkušebního napětí a impulzní proudové odezvy. Jak je ukázáno na obrázku 34, mohou být zaznamenány různé průběhy a použity samostatně nebo v kombinaci. Tyto příklady jsou uvedeny níže.:

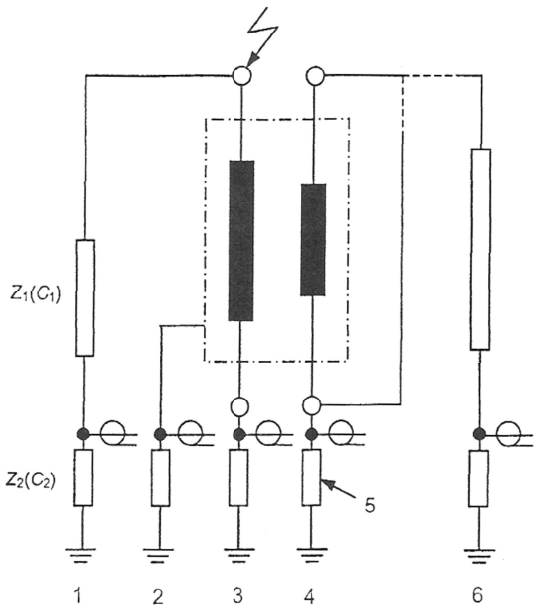
a) proud tekoucí svorkou N (pro vinutí zapojená do hvězdy a do lomené hvězdy, u kterých nemůže být svorky N během zkoušky uzemněna)
b) proud tekoucím vinutím (pro vinutí zapojená do hvězdy a do lomené hvězdy, u kterých nemůže být svorka N během zkoušky uzemněna)
c) přenesený proud do přilehlého zkratovaného a nezkoušeného vinutí, nazývaného jako 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]

Legenda:

1 měřící obvod napětí
2 proud tekoucí nádobou
3 proud tekoucí svorkou N nebo vinutím
4 kapacitně přenesený proud
5 proudové bočníky
6 měřící obvod napětí a přenesené napětí



Obr. 34. Zapojení fázových svorek [5]

4.2 Analogové a digitální záznamové systémy

Detailní požadavky na analogové a digitální osciloskopy jsou uvedeny v IEC 61083-1. Při použití digitálního osciloskopu se nám vytváří možnost pro matematickou interpretaci výsledků a umožňuje využití dodatečného matematického zpracování, například pro analýzu poruch. Tyto techniky jsou určitým příslibem, nicméně interpretace výsledků není dosud zcela prokazatelná a jednoznačná. Když porovnáme průběhy získané z digitálního osciloskopu, neměli by být tyto průběhy podrobeny matematickému zpracování, filtraci nebo vyhlazení. Stejně tak je důležité použít nezpracovaná data po vyhodnocení nestandardních tvarů impulzů. V případě, že jsou digitální osciloskopy použity jako jednoduché měřící zařízení k přímému měření průběhu napětí, bez záměru provádět matematické zpracování (rychlá Fourierova transformace, podrobněji v normě IEC 60076-4) zaznamenaných dat, musí být pokládány za technicky dokonalé analogové přístroje.

4.2.1 Analogový záznam průběhu

Vyhodnocení výsledků zkoušky je prováděno srovnáváním záznamů napěťových impulzů anebo proudových impulzů přiložených při snížené a plné hladině. Výhodnější je vyhodnotit záznam při stejné amplitudě použitím vhodných děličů umístěných v osciloskopech.

- **Záznam průběhu impulzu napětí**

Tvar impulzu napětí určíme tak, že časový rozklad pořízených záznamů za účelem stanovení tvaru vlny při předběžném nastavení parametrů zkušebního obvodu bude ≤10μs pro čelo vlny.

Ze záznamu týlu vlny bychom měli být schopni vyhodnotit dobu půltýlu a, příležitostně, vyhodnotit amplitudu opačné polarity.

Při záznamu tvaru impulzu po přiložení zkušebního impulzního napětí, rozeznáváme pro stanovení amplitudy zkušebního impulzu a detekci možné poruchy dva případy:

- u plné vlny by neměl být časový rozklad menší než 100μs
- u useknuté vlny by měl být postačující časový rozklad mezi 10μs a 25μs.

- **Záznam průběhu impulzu proudové odezvy**

Impulzní proud je nejcitlivějším parametrem při detekci poruch. Zaznamenané proudové průběhy jsou důležitým kritériem při vyhodnocení výsledků zkoušky a z toho důvodu musí být použité řešení co možná nejzřetelnější při interpretaci oscilogramů, včetně složek vyšších kmitočtů v blízkosti čela vlny.

4.2.2 Digitální záznam průběhů

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.

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 i napájecí zdroj.

Obrazovka zapisovače by měla mít rozlišení ≥ 768 x 1024 bodů a tiskárna by měla mít ≥ 300 bodů na palec. [5]

4.2.2.1 Digitální záznam průběhu impulzu napětí

Pro stanovení tvaru impulzu preferujeme dobu záznamu stanovenou v rámci předběžného nastavení parametrů zkušebního obvodu, tak aby doba čela vlny byla ≤ 10μs. Záznam týlu vlny by měl umožňovat vyhodnocení doby půltýlu a, v případě nutnosti, vyhodnocení amplitudy opačné polarity.

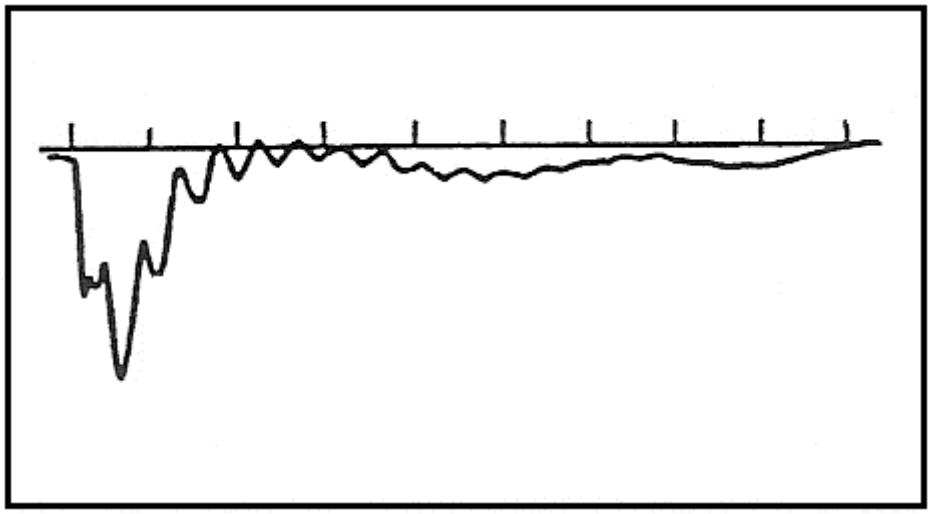
Norma IEC 61083-1 stanovuje 9bitový zapisovač 60MHz s minimální rozlišovací schopností pro záznam průběhů impulzů napětí a proudu. Při použití časové lupy na časový úsek 10μs pro vyhodnocení čela vlny nebo vyhodnocení useknutých impulzů by mělo být zváženo použití 10bitového zapisovače se vzorkovacím kmitočtem 100MHz. Pro záznam tvaru a stanovení amplitudy zkušebního impulzu a možnosti detekce poruchy mohou nastat dva případy:

- v případě plné vlny, délka časového úseku na vzorkovaných datech by neměla být menší než 100 μs
- v případě useknuté vlny, délka časového úseku od 10 μs do 25 μs

Vzorkovací kmitočet od 10 MHz do 20 MHz na kanál digitálního osciloskopu je obvykle dostačující, protože maximální rezonanční kmitočty částí vinutí obvykle nepřesahují 1 MHz až 2 MHz. Pro vyhodnocení analýzy tvaru impulzu je důležité použít vzorkovaní přes celý tvar impulzu až do jeho úplného zatlumení s využitím maximální kapacity paměti digitálního osciloskopu. Musíme naprogramovat digitální osciloskop tak, aby byl k dispozici dostatečný počet vzorků pro stanovení skutečného začátku průběhu impulzu. Dále je důležité použít maximální možné využití rozsahů vstupních zesilovačů digitální osciloskopu. Z tohoto důvodu může být pro nastavení optimálního rozsahu amplitudy napěťové vlny nebo posunutí u každého kanálu potřebné přiložit několik impulzů na hladině 50%. Pozornost by měla být v případě atmosférických impulzů věnována velikosti překmitu do opačné polarity. Při měření tohoto překmitu může dojít k oříznutí záznamové vlny, a to z důvodu přesycení vstupních zesilovačů digitálního osciloskopu ve zvoleném rozsahu.

4.2.2.2 Digitální záznam tvaru impulzu proudové odezvy

Nejcitlivějším parametrem při detekci poruch je obvykle impulzní proud. Proto představují zaznamenané průběhy proudu hlavní kritéria pro vyhodnocení výsledků zkoušky. Data uložená v paměti digitálního osciloskopu nicméně umožňují další vyhodnocení stejného záznamu použitím časové lupy. Vzorkovací kmitočty a rozlišení vstupních kanálů osciloskopu jsou stejné jako v 4.2.1.



Obr. 35. Proud tekoucí N svorkou při zkoušce atmosférickém impulzu – bez poruchy

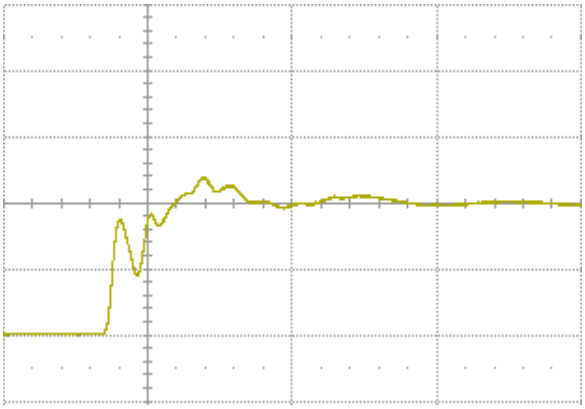
4.3 Nastavení digitálního osciloskopu

Se zavedením digitální záznamové techniky při zkouškách atmosférickým impulzem se nyní vytvořily další nástroje použitelné pro analýzy poruch. A tudíž musí být správně nastaven digitální osciloskop, z důvodů správného snímání a vyhodnocení poruch.

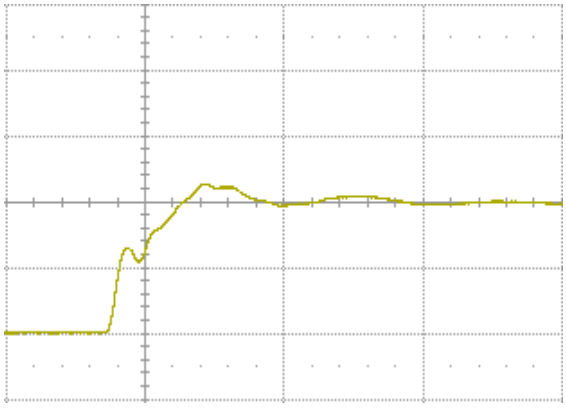
U digitálních osciloskopů jsem se zejména zaměřil na různé druhy matematických metod, druhy analýz, na šířku frekvenčního spektra a vzorkování při jednotkovém impulzu. Výše zmíněné nastavení jsem si odzkoušel na digitálním osciloskopu typu LeCroy 7300A. Výsledky jednotlivých nastavení a jejich grafická podoba je uvedena níže:

- **vliv šířky frekvenčního spektra**

Různá šířka frekvenčního spektra nastavená na digitálním osciloskopu ovlivní snímaný impulz takovým způsobem, že určitou část spektra digitální osciloskop vůbec nezobrazí. Tyto rozdíly ve frekvenčních spektrech můžete vidět na jednotkovém impulzu a zobrazené na obrázkách 35a a 35b.



Obr. 36a

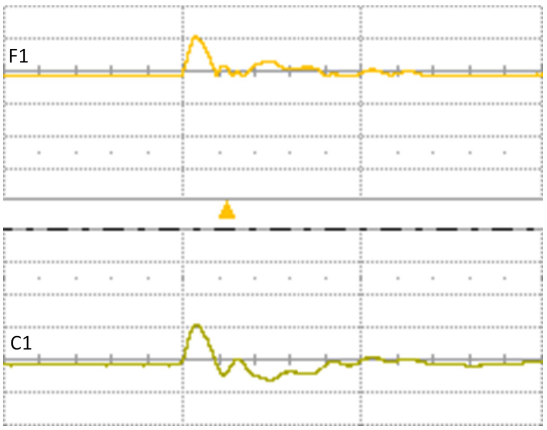


Obr. 36b

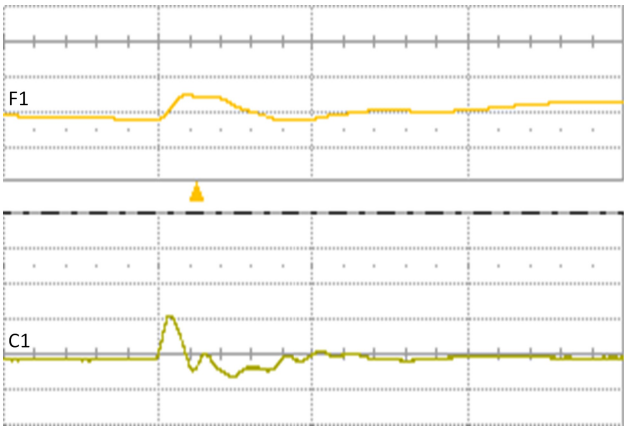
Obr. 36. a) Celé frekvenční spektrum – impulz nezkreslen; b) frekvenční spektrum 20 MHz – impulz zkreslen

- **vliv matematických metod**

Pokud na digitálním osciloskopu nastavíme špatný matematický výpočet snímaného impulzu, tak se snadno stane, že snímaný impulz bude zcela zkreslen. Tuto možnost jsem vyzkoušel na integrální metodě (obr. 37 – křivka F1, C1 – jednotkový impulz) a na absolutní hodnotě (obr. 36 – křivka F1, C1 – jednotkový impulz). Tyto dvě možnosti jsou změřeny na čtvrté odbočce měřeného modelu.



Obr. 37. Jednotkový impulz změřen absolutní metodou



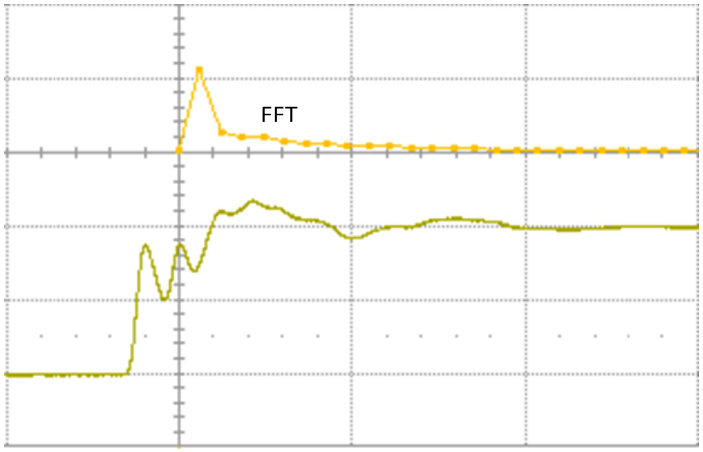
Obr. 38. Jednotkový impulz změřen integrální metodou

- **rychlá Fourierova transformace**

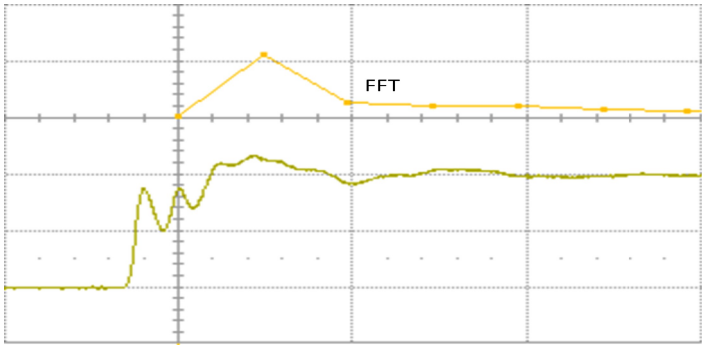
Podstata metody přenosové funkce je založena na převodu záznamu, pořízených v reálném čase, přiloženého napětí *U(t)* a výsledné impulzní proudové odezvy *I(t)*, buď měřením proudu tekoucího svorkou N transformátoru nebo proudu mezi zkratovým nezkoušeným vinutím a zemí (kapacitně přenesený proud) do kmitočtové oblasti *U(ω)* a *I(ω)* pomocí algoritmů rychlé Fourierovi transformace (Fast Fourier Transformation - FFT). [5]
Potom spektra napětí a proudu (*U(ω) a I(ω)*) mohou být matematicky tvořena:

a) podílem *U(ω)/I(ω)*, který vyjadřuje funkci přenosové admitance
b) podílem *I(ω)/U(ω)*, který vyjadřuje funkci přenosové impedance

Metoda rychlé Fourierovy transformace je závislá na správném nastavení vzorkování v čase a počtu nasnímaných dat za jednotku času. Tento způsob ovlivňování FFT jsem si vyzkoušel na digitálním osciloskopu. Výsledné nasnímané průběhy jednotkového impulzu v porovnání s FFT se správným vzorkováním (obr. 38a) a se špatným vzorkováním (obr. 38b), kde FFT vynechává určitá snímaná data.



Obr. 39a



Obr. 39b

Obr. 39. Zobrazení rychlé Fourierovy transformace v závislosti na vzorkování

5 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo prakticky ověřit různé vlivy na rozložení napětí při atmosférických jevech ve vinutí výkonového transformátoru. Měřením na vyrobeném modelu jsem ověřil, že při namáhání vinutí transformátoru rázovým napětím dochází k velmi nerovnoměrnému zatíženo jeho izolace. A k této problematice jsem se snažil získat co nejvíce informací, abych zjistil, jaké můžou nastat komplikace u analýzy při zkouškách atmosférickým impulzem. V neposlední řadě jsem získával informace, jak se chová zkoušený objekt u zkoušky atmosférickým impulzem a jak může tato zkouška ovlivnit zkoušený objekt.

Na jednotlivých odbočkách vinutí transformátoru se objevuje napětí, jehož časový průběh je vzhledem ke tvaru příchozího impulzu deformovaný a jehož amplituda může být vyšší, než je amplituda napěťového rázu. Pro zabezpečení spolehlivosti transformátoru je třeba užít metod tak, aby negativní účinky vyvolané atmosférickým přepětím byly co nejvíce minimalizovány.

Měření jsem nejprve prováděl na modelu jednopolohové cívky, kde jsem měřil dva stavy a to pro uzemněný a pro izolovaný konec vinutí. Z naměřených hodnot je vidět vliv přivedeného useknutého impulzu na vstupní svorky transformátoru, což je horší varianta.

Další objektem byly lokomotivní cívky, kde jsem zaznamenával výsledky přímého a prokládaného vinutí. U prokládaného vinutí se prakticky počáteční rozložení napětí nelišilo od konečného a bylo zde dosaženo nejlepších výsledků odstranění nepříznivých vlivů.

Při měření atmosférických zkouškách se musíme řídit příslušnými normami, ve kterých jsou definované parametry od typů napěťových impulzů až po měřící techniku. Tyto parametry je nutno dodržovat, aby záznamy zkoušek impulzním napětím byly věrohodné. Dříve bylo určitě náročnější, při tehdejší měřicí technice, pořídit kvalitní záznam. Jelikož nebyly na zařízení kladeny takové nároky jako dnes. Proto také v současné době ve většině případů používáme v měřicí technice digitální záznamy. Bohužel digitální technika při zkouškách rázovými napětími není tak užitečná jak bychom chtěli, musíme hlídat, aby nedošlo ke ztrátě informací. Jak je již známo digitální osciloskop nám zobrazuje průběhy pomocí vzorkování, a právě při vzorkování, nebo vyhlazení můžeme o důležité informace přijít. O část informací můžeme přijít i u špatně nastavené rychlé Fourierovy transformace (FFT).

Použitá literatura

[1] Veverka, A.: *Technika vysokých napětí*, SNTL, Praha 1982
[2] Mayer, D.: *Úvod do teorie elektrických strojů*, SNTL, Praha, 1978
[3] Norma ČSN EN 60071-1, Český normalizační institut, Praha 2006
[4] Norma ČSN EN 60076-2, Český normalizační institut, Praha 2001
[5] Norma ČSN EN 60076-4, Český normalizační institut, Prha 2003
[6] Norma ČSN IEC 60-1, Český normalizační institut, Praha 1993
[7] Norma ČSN EN 60060-2, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha 2011
[8] Klor, T.: *Zkoušky atmosférickým a spínacím impulzním napětím – výkonové transformátory a tlumivky*, bakalářská práce, Plzeň 2010
[9] Zach, T.: *Výkonové transformátory při zkoušce atmosférickým impulzním napětím*, diplomová práce, Plzeň 2007
[10] LAURENC, Jiří.: *Home.zcu.cz* [online]; Předmět TVN
www: <http://home.zcu.cz.cz/~laurenc/tvn.php> [18.4.2012]