

Jaroslav Petráš, Jaroslav Džmura

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

## Tranzientné efekty vo vvn transformátoroch

**Abstrakt.** V článku je analyzovaná situácia počas skúšok transformátorov vysokého a veľmi vysokého napätia pre obnovenie izolačnej pevnosti daného napätia pri pôsobení tranzientných napätí. Je predstavený návrh na meranie rozloženia napätia pozdĺž vinutia cievky a analýza impulzných napäťových skúšok transformátora na modeli cievky so zapojením pri meraní trojfázového transformátora impulzným napätím.

**Abstract.** The authors provide an analysis of situation during HV and EHV transformer tests, which are made to renew insulation strength at certain voltage effect. They also propose a model for voltage distribution along coil winding and an analysis of pulse voltage tests for transformers with circuit connection for 3-phase transformer measurement by pulse voltage so that we can detect defected place from a waveform.

**Kľúčové slová:** tranzientný jav, jednotková impulzná vlna, rozloženie napätia.

**Keywords:** transient effect, unit pulse wave, voltage distribution

### Úvod

Transformátory sú kľúčovými prvkami prenosu elektrickej energie v sieťach. Počas ich prevádzky sú vystavené atmosférickým a spínacím prepätiam vyvolávajúcim vznik postupujúcich vln po vedeniach, tranzientné efekty v transformátoroch.

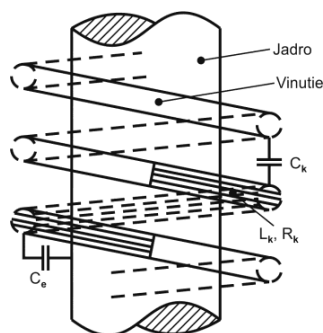
Prechodné javy takto vznikajúce spôsobujú elektrické namáhanie medzi vinutiami, medzi vinutím a magnetickým jadrom, prípadne medzi vinutím a nádobou transformátora. Izolácia namáhaná termicky, mechanicky (vibráciami), prevádzkovou frekvenciou a navyše aj tranzientnými napätiami.

Tieto javy boli popísané v [1, 4, 2, 3]. Môžu nastať 3 stavy: cievky (vinutia) transformátorov s uzemneným koncom vinutia, cievky s otvoreným koncom vinutia a stav, ktorý poukazuje na prechod z počiatočného do konečného rozloženia napätia, pričom tento fenomén sprostredkujú voľné kmity vinutí.

Uvádzame náhradnú schému idealizovaného vinutia transformátora. Modelové kapacity hrajú dôležitú úlohu vo zvolenej schéme.

### MODEL VINUTIA TRANSFORMÁTORA

Na Obr. 1 je uvedená náhradná schéma jedného vinutia, kde je potrebné uvažovať o pozdĺžnej indukčnosti, kapacite voči zemnému potenciálu a pozdĺžnej kapacite medzi dvomi susednými závitmi.

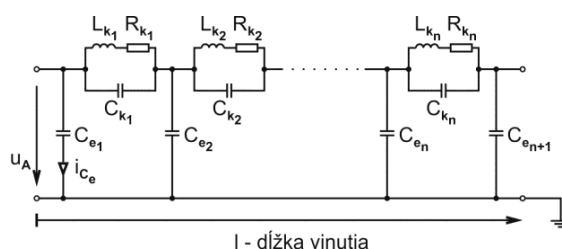


$C_e$  - Kapacita medzi elementom vinutia a zemou,  
 $C_k$  - Kapacita medzi dvoma elementmi vinutia,  
 $L_k$  - Induktivita elementu vinutia,  
 $R_k$  - Ohmický odpor elementu vinutia.

Obr.1. Model jednopohového vinutia transformátora

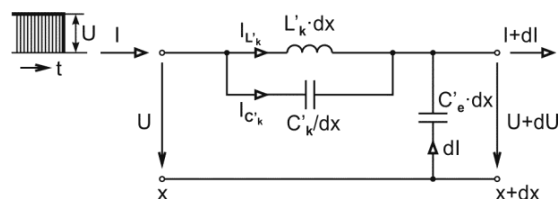
Potom pri sériovom zapojení elektrickej schémy závitů môžeme vytvoriť model celého reťazca na Obr. 2. Je to ideálny model so sériovými odpormi  $R_{k1}$  až  $R_{kn}$  v článku  $L_k$

$R_k$   $C_k$ . V reálnych podmienkach hodnoty odporov  $R_k \cdot dx$  je možné zanedbať.



Obr.2. Náhradná schéma modelu vinutia transformátora

Predpokladáme pre vinutie transformátora  $R_k \rightarrow 0$  a amplitúdu impulznej vlny  $U = 1$ .



Obr.3. Náhradná schéma elementárnej časti vinutia s dĺžkou dx

Pre jeden element z diferenciálnych rovníc platí, že:

$$(1) \quad L'_k : dU = -L'_k \cdot dx \cdot \frac{\partial i_{L'_k}}{\partial t}, \text{ kde } L'_k = \frac{L_k}{l}$$

$$(2) \quad C'_k : i_{C'_k} = -\frac{C'_k}{dx} \cdot \frac{\partial dU}{\partial t}, \text{ kde } C'_k = C_k \cdot l$$

$$(3) \quad C'_e : dI = -C'_e \cdot dx \cdot \frac{\partial (U + dU)}{\partial t}, \text{ kde } C'_e = \frac{C_e}{l}$$

Potom:

$$(4) \quad \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = L'_k \cdot C'_e \cdot \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - L'_k \cdot C'_k \cdot \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial t^2 \cdot \partial x^2}$$

Pri jednotkovej impulznej vlny na vstupe vinutia v čase  $t=0$  sa uplatňujú iba kapacity vinutia. Samotné rozloženia napätia je počiatočnou distribúciou napätia [1]:

$$(5) \quad u_0 = \frac{\sinh \gamma(l-x)}{\sinh \gamma l}, \text{ kde } \gamma = \sqrt{\frac{C_e}{C_k}} \cdot l$$

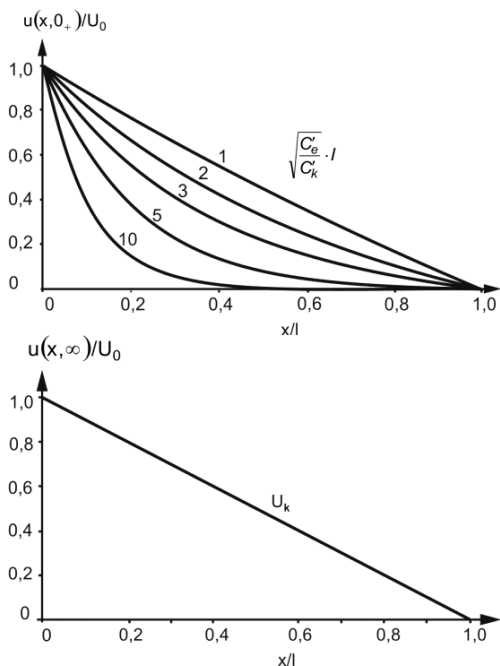
Po nekonečne dlhom čase od prítomnosti jednotkového pravouhlého impulzu napätia na vstupnej svorke ( $t \rightarrow \infty$ ) dochádza ku konečnému rozloženiu napätia. Riešením rovnice  $\frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2} = 0$  bude:  $u_k = A_k \cdot x + B_k$ , z čoho pri uzemnenej cievke ( $x = l$ ) vypočítame:

$$(6) \quad u_k = 1 - \frac{x}{l}$$

Priebehy rovníc vidno na Obr. 4.

Platí, že:

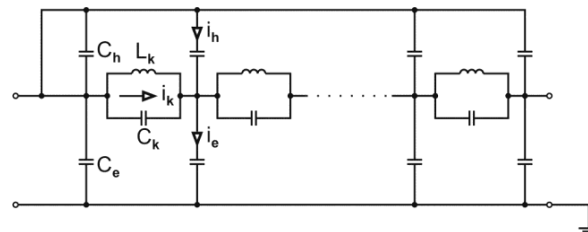
- počiatkové rozloženia napätia určujú kapacity,
- nelineárne rozloženia napätia veľmi silne namáha izoláciu prvých závitov vinutia
- čím je menší pomer kapacít pozdĺžnych a priečných, tým viac sa odlišuje počiatkové od konečného rozloženia napätia
- pri prechode do počiatkového do konečného stavu rozloženia napätia dochádza ku vzniku intenzívnych vyrovnávacích kmitov, ktoré veľmi silne namáhajú izoláciu vinutia,
- zväčšenie tlmenia nemá význam, pretože sa tým môžu zvýšiť prevádzkové straty.



Obr.4. Počiatkové a konečné rozloženie napätia pre uzemnený koniec vinutia

### KAPACITNÉ TIENENIE PRE ZVÝŠENIE VN VÄZBY

Kapacity v náhradnom modeli vinutia majú veľký vplyv na distribúciu napätia. Ďalšia možnosť na riadenie počiatkového rozloženia napätia ako aj intenzity elektrického poľa E je umiestnenie veľkoplošnej elektródy na vysokonapäťovej strane vinutia, čím zvýšime vysokonapäťovú kapacitnú väzbu. Prúd, odpovedajúci kapacite voči zemi, tečie v ideálnom prípade cez vn kapacitu, čím dochádza k linearizácii rozloženia napätia.



Obr.5. Náhradná schéma modelu s kapacitným tienením

Pre kapacitné tienenie platí:

ak  $i_h = i_e$  a  $u(x) = U_0 \cdot k(x)$

$$(7) \quad C'_h \cdot \frac{d(u_0 - k(x) \cdot U_0)}{dt} = C'_e \cdot \frac{d(k(x) \cdot U_0)}{dt}$$

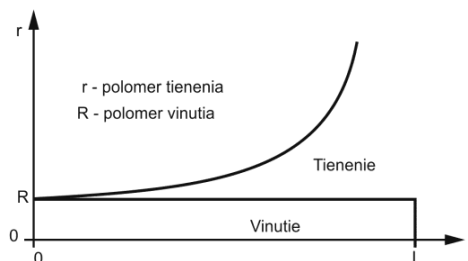
$$(8) \quad C'_h = C'_e \cdot \frac{k(x)}{1 - k(x)}$$

Pri uzemnenom konci vinutia dostávame lineárne rozloženie napätia, určené vzťahom:

$$(9) \quad k(x) = \frac{l-x}{l}$$

Pre cylindrický kondenzátor:

$$(10) \quad r = R + \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \frac{R}{C'_e}}{\frac{l}{x} - 1}$$



Obr.6. Situačné zobrazenie tienenia na vysokonapäťovom vinutí

Pre celé vinutie sú tieto úpravy konštrukčne náročné a ekonomicky vysoké. Pre zníženie náročnosti je možné zvážiť s montáž tienenia v prvej skupine cievok na vstupe do vinutia transformátora.

### MERANIA TRANSFORMÁTOROV IMPULZNÝM NAPÄTÍM

Skúšky transformátora sú vykonávané najčastejšie pre:

- určenie izolačnej pevnosti výkonového transformátora pri pôsobení prechodných napätí,
- typové skúšky pri transformátoroch,
- kusové skúšky pri transformátoroch nad 245 kV podľa medzinárodných noriem.

Podľa typu transformátora impulzné skúšky pozostávajú z čiastkových skúšok:

- impulzné napäťové skúšky s plnou a kusou vlnou,
- spínacie impulzné napäťové skúšky.

Pri skúškach sa sleduje merané napätie a prúdy, ako aj najvyššia efektívna hodnota napätia vodič – vodič.

## DISKUSIA A ZÁVER

Analyzovali sme elektro-fyzikálne javy, ktoré prebiehajú v cievkach vysokonapäťových transformátorov prípadne v cievkach vysokonapäťových strojov točivých po dopade prepäťovej impulznej vlny na vstup cievky.

Javy sme popisovali pre prípad cievky s uzavretým (uzemneným) koncom a s koncom otvoreným. Boli odvodené rovnice pre oba prípady. Závažným prípadom je prechod z počiatočného do konečného stavu rozloženia napätia.

Uvádzame aj situácie z praxe, kedy sa využívajú meracie metódy na transformátoroch a aplikujú sa v skúšobníctve.

Merania reálne aplikovateľné pre prax sú skúšky plnou napäťovou a prúdovou vlnou a porovnanie tvaru oboch typov impulzov ako aj skúšky kusou vlnou, skúšky plnou impulznou vlnou pri závitovom skrate. Skrat sa vyvolá premostením dvoch ľubovoľných vývodov cievky. Aplikuje sa plná napäťová a prúdová impulzná vlna na vinutie. V nasledujúcom meraní sa nahradí premostenie nízkohmovým odporom ( $10 \Omega$ ) a porovnajú sa dosiahnuté výsledky merania.

## PodĎakovanie

Túto prácu podporili: Vedecká grantová agentúra MŠVVaŠ SR a SAV projektami VEGA č. 1/0154/21, VEGA č. 2/0011/20 a a Agentúra na podporu vedy a výskumu v rámci projektu APVV-18-0160.

## Literatúra

- [1] Veverka, A.: Technika vysokých napětí, SNTL Praha, ALFA Bratislava 1978
- [2] Lesch, G.: Lehrbuch der Hochspannungstechnik, Springer Verlag Berlin Göttingen Heidelberg 1959
- [3] Slamecka, E.; Waterschek, W.: Schaltvorgänge in Hoch – und Niederspannungsnetzen; SIEMENS A.G., Berlin – München 1972
- [4] Roth, A.: Hochspannungstechnik, Springer Verlag, Berlin 1965

**Autori:** *Jaroslav Petráš, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Másiarska 74, 041 20 Košice, E-mail: jaroslav.petras@tuke.sk.*  
*Jaroslav Džmura, Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Másiarska 74, 041 20 Košice, E-mail: jaroslav.dzmura@tuke.sk.*