

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra *elektroenergetiky*

Ing. Jan Mikeš

**IMPULZNÍ INTERAKCE VE VINUTÍCH VÝKONOVÝCH
TRANSFORMÁTORŮ**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: *Elektroenergetika*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, *srpen 2013*

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na katedře *elektroenergetiky* Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Jan Mikeš
Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd (K13116)
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel: Doc. Ing. Vladislav Kvasnička, CSc.
Katedra elektroenergetiky
Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6

Školitel-specialista: Ing. Vítězslav Pankrác, CSc.
Katedra elektromagnetického pole
Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze
Technická 2, 166 27 Praha 6

Oponenti:

.....

.....

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru *Elektroenergetika* v zasedací místnosti č. Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

předseda komise pro obhajobu disertační práce
ve studijním oboru
Elektroenergetika
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Impulznímu namáhání elektrických strojů je dlouhodobě věnována výrazná pozornost v odborné literatuře. Vývojově na dostupných matematických teoriích (od počátku 20. století) byly vytvářeny přesnější, výpočtově složitější, ale i méně náročné a zároveň méně přesné matematické modely [2, 22]. Vzhledem k často nepřesnému a málo věrohodnému stanovení vstupních parametrů vinutí v modelu vznikají nejrůznější zjednodušené představy o rozložení napětí v transformátoru. Častěji je problematika řešena na příkladu jednopohové cívky. Výsledky řešení jsou pak rozšířeny na celá vinutí i vícevinutových transformátorů. Transformátorová více-pohová cívka je z pohledu rozložení napětí bez dostatečně přesné znalosti jejích parametrů natolik komplexní úloha, že se dá předpokládat velmi malá shoda v případech jejich zanedbávání.

Bývalé Československo (od 50. let 20. století do roku 1989) patřilo k vůdčím státům, které vytvářely hodnotné matematické modely jedno i více-pohových cívek – viz práce A. Veverky, B. Hellera, Š. Matěny [2, 20]. Před rokem 1989 nemohly být tyto práce dostatečně rozšířeny v zahraničí (i přesto, že studie A. Veverky a B. Hellera [2] vyšla v roce 1968 v omezeném nákladu v anglickém jazyce), proto je to k tématu cenná a zahraničím i v současné době reflektovaná bibliografie.

V posledním desetiletí se však k problematice impulzního namáhání stále více vrací jak akademická, tak podnikatelská a praktická pracoviště [1, 3, 5]. Snahou velkých výrobců transformátorů a tlumivek je mít prediktivní výpočtovou možnost, kterou by mohli před návrhem transformátoru deklarovat jeho odolnost před impulzním namáháním (nejčastěji impulzem $1,2/50\mu\text{s}$, ale i spínacím impulzem, či useknutým impulzem v týlu). Dosud se odolnost ověřuje pouze prostřednictvím sejmuté osciloskopické odezvy z odboček vinutí transformátoru při přivedení impulsu na jeho vstupní svorku. Vzniká tak časoprostorový průběh vlny napětí, ve kterém se sleduje místo maximálního namáhání cívky. Tato metoda se dá aplikovat pouze na sestavený transformátorový celek [7–9].

Vzhledem k omezené možnosti vypočítat všechny parametry vinutí, počítat přesně v modelu s vlastní i vzájemnou indukčností a respektovat vliv parametrů okolních cívek, jsem se rozhodl ověřit platnost numerického řešení přesného modelu pouze při respektování zjednodušeného výpočtu těchto parametrů. Pro jejich výpočet jsem čerpal především ze vztahů uvedených v literatuře [1, 3–6]. Pro výpočet kapacitních vazeb potom v člancích [11, 19]

a pro respektování induktivních souvislostí v [10, 15]. Tímto modelem bych chtěl upozornit na nutnost dbát velké opatrnosti při vytváření závěru z nekompletních či velmi málo validních obvodů, které reprezentují jen omezené vlastnosti přenesené na celá vinutí, resp. na vícevinutňové systémy – třífázových transformátorů s respektováním vlivu všech vzájemných vazeb, a tím i na obvody, které reflektují zjednodušené výpočty parametrů L , M , C , K , R .

Při příchodu napěťového impulzu na vinutí transformátoru lze uvést, že rozložení napětí podél vinutí je závislé pouze na kapacitních poměrech ve vinutí, neboť indukčnost v čase blízkém nule lze zanedbat. Zcela zásadní roli na počáteční rozložení napětí mají konstrukční parametry cívek samotného transformátoru. Obálka volných kmitů pak představuje teoretické maximální napěťové namáhání izolace v libovolném bodě vinutí. Výpočtům samotných parametrů podélné a příčné kapacity a vlastní a vzájemné indukčnosti cívek transformátorů byla věnována mnohem menší pozornost [10], než například samotným teoriím výpočtu a návrhu řešení vlnových jevů ve vinutí [12–14, 16–18, 20, 22]. Takovýto model má objektivnější výsledky, než snaha postihnout současně všechny vlivy uvnitř transformátoru.

V odborné literatuře lze vysledovat dva přístupy k řešení problematice rozložení impulzního napětí v transformátoru. Jedním z nich je konstrukce modelu se soustřednými parametry, druhým pak sledování významu rozprostřených parametrů.

Autoři rozlišují modely na *Fast transient overvoltages* (FTO) a na *Very fast transient overvoltage* (VFTO) [14, 21]. V případě modelů FTO, kde se předpokládá frekvence v rozsahu $10 \text{ kHz} \leq f \leq 1 \text{ MHz}$, bylo publikováno mnoho modelů založených na teorii dvojbranů [18], které jsou řazeny do kaskád a počítány příslušnými výpočetními prostředky. Pro modely VFTO, tedy modely s frekvencí nad 1 MHz, je již nemožné zanedbávat vlnovou délku vstupního vysokofrekvenčního impulzu a obvody se řeší pomocí rozprostřených parametrů – těchto modelů je již omezený počet, neboť jejich hlavním úskalím je obtížné numerické řešení parciálních diferenciálních rovnic hyperbolického typu [13, 21] – nejčastějšími způsoby jsou potom hybridní způsoby výpočtu, kdy části vinutí jsou vypočítány jako soustředné – například pro nižší frekvence, kdy převládá vliv indukčnosti a jako rozprostřené pro okamžiky, kdy v obvodu má explicitní význam kapacita [15, 17]. Modely se soustřednými parametry omezují výpočet pouze na předem determinovaná místa ve vinutí, není možné sledovat průběh napětí v libovolném místě vinutí.

Samotné typy používaných vinutí mají také velký vliv na konstrukci příslušných modelů – nejčastěji bývá použita zjednodušená cesta přes jednoduché jednovrstvé cívky, avšak vinutí transformátorů bývají mnohem složitější. Často jsou použita vícevrstvá vinutí kotoučová, válcová, respektive bývají aplikovány speciální úpravy například prokládaným vinutím, avšak ty jsou používány pro vyšší napěťové hladiny. Příkladem studií, které se zabývají těmito tématy, jsou [15, 17]. Posledním přístupem v modelování odolných transformátorů je aplikace nejrůznějších omezovacích prvků, svodičů přepětí, respektive použití staršího způsobu napěťově závislých laků [12, 16].

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

1. Sestavení vhodného fyzikálního modelu interiéru třífázového distribučního transformátoru, který by byl přesnější než modely dosavadní (např. respektuje 3D konfiguraci vinutí, vliv reálného rozložení vinutí, působení zbývajících zasažených i nezasazených fází vinutí, akceptuje magnetické a kapacitní vazby s ostatními fázemi transformátoru, apod.).
2. Sestavení příslušného matematického modelu a nasazení vhodné efektivní numerické metody jeho řešení.
3. Provedení teoretické analýzy včetně predikce týkající se kvality napěťové (resp. potenciálové) odezvy při různých konfiguracích vinutí (jednovrstvé a vícevrstvé vinutí).
4. Dovedení dosažených výsledků až k praktickým závěrům, které by byly užitečné pro projektanty vinutí transformátorů, tj. zobrazovat průběh napětí podél vinutí v kterékoliv části vinutí.

3. METODY ZPRACOVÁNÍ

Principiálně je každé i sériově konstruované zařízení použité v elektroenergetické soustavě zařízením zcela individuálním. Tuto skutečnost ovlivňují především vyšší hladiny provozního napětí, exteriérová umístění zařízení, vystavení nepříznivým klimatickým podmínkám, poruchové stavy v soustavě, které mohou mít přímý nebo přenesený dopad na mnoho dalších faktorů. Z tohoto pohledu se velmi obtížně konstruují zařízení, která by odolávala za všech okolností a ve všech případech uvedeným vlivům. Velmi identické je to s odolností zařízení vůči přepětí. Transformátorové vinutí je namáháno jak vnitřním, tak vnějším přepětím. Vnější je vyvoláno atmosférickými výboji a je omezeno bezpečnostními ochrannými prvky

(omezovači, bleskojistkami, přepět'ovými ochranami). I tak však ohrožuje izolaci vinutí proti zemi stejně jako mezizávitovou izolaci vinutí. Vnitřní přepětí může způsobit náhlá změna parametrů soustavy a je závislé na provozním napětí. Každá transformátorová cívka se ve vztahu k přepětí chová jako velmi složité seskupení kapacit a indukčností.

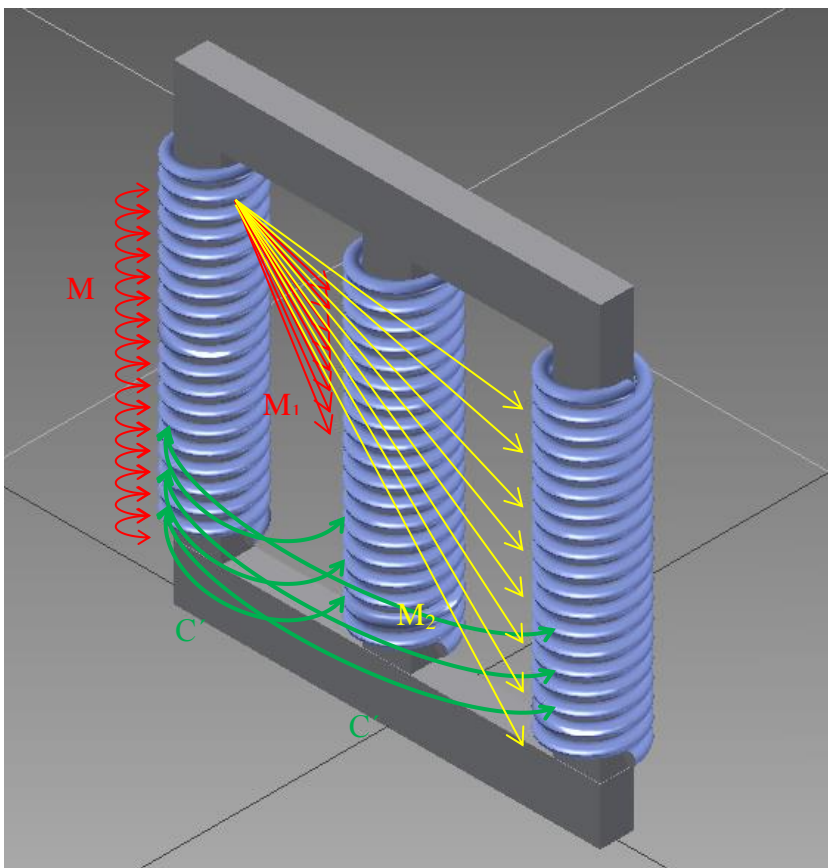
Na základě těchto skutečností jsem stanovil následující hypotézy:

- 1) Jakým způsobem lze matematicky a fyzikálně popsat většinu souvislostí, které konstrukčně definují trojfázový transformátor odolný proti vlivu přepětí?
- 2) Do jaké míry existuje shoda mezi matematickým modelem a reálným objektem?
- 3) Jak zpřesňování samotného modelu po stránce výpočtové metody ovlivňuje získané výsledky?
- 4) Do jaké míry je užitečné tento model zpřesňovat, a jaký to má vliv na praktické konstrukční důsledky?

Z metodického hlediska lze rozlišit dvě přístupové cesty při fyzikálně-matematickém popisu přepět'ových jevů.

První spočívá v sestavení tzv. *polního modelu*, tj. ve formulaci elektromagnetického pole v oblasti vinutí, jakožto okrajové úlohy pro parciální diferenciální rovnice typu vlnových rovnic, v nichž jako neznámá veličina nejčastěji figuruje vektorový magnetický potenciál, méně často jako vektorový elektrický potenciál. Vlastní řešení této 3D, případně 2D úlohy, lze z numerického hlediska dobře zvládnout aplikací vhodného komerčního programu (zřejmě založeného na metodě konečných prvků), avšak není snadné určení příslušných okrajových podmínek.

Druhá koncepce je založena na sestavení tzv. *obvodářského modelu*, tj. formulaci soustavy obyčejných diferenciálních rovnic pro lokálně diskretizovaný obvod obsahující prvky L , M , C , K , R obvodových parametrů, k jejichž numerickému řešení lze použít některou standardní numerickou metodu. U tohoto způsobu řešení je problémem přesného určení parametru L , M , C , K , R a také sestavení 3D obvodářského modelu naráží na jistá úskalí. Vlastní numerické řešení je ovšem u obou způsobů doprovázeno nutností vypořádat se s věrohodností získaných výsledků řešení (zejména stabilita, konvergence apod.).



Obrázek 1 – Intuitivní schéma vazeb uvnitř trojfázového transformátoru

Na základě vztahů pro jednovrstvou cívku jsem odvodil analytický popis modelu celého jádrového transformátoru akceptujícího elektromagnetické i elektrostatické vazby mezi jednotlivými fázemi.

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2}{\partial x^2} \begin{bmatrix} u_a(x,t) \\ u_b(x,t) \\ u_c(x,t) \end{bmatrix} + \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbb{A} \cdot \begin{bmatrix} u_a(x,t) \\ u_b(x,t) \\ u_c(x,t) \end{bmatrix} + K \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} \begin{bmatrix} L & M_1 & M_2 \\ M_2 & L & M_1 \\ M_1 & M_2 & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a(x,t) \\ u_b(x,t) \\ u_c(x,t) \end{bmatrix} \\
& + R \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} -C-C'-C'' & C'' & C' \\ C'' & -C-C'-C'' & C' \\ C' & C'' & -C-C'-C'' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a(x,t) \\ u_b(x,t) \\ u_c(x,t) \end{bmatrix} + RK \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial t} \begin{bmatrix} u_a(x,t) \\ u_b(x,t) \\ u_c(x,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
\mathbb{A} = & \begin{bmatrix} -LC-LC'-LC''+M_1C''+M_2C'; & LC''-M_1C-M_1C'-M_1C''+M_2C''; & LC'+M_1C'-M_2C-M_2C'-M_2C'' \\ LC''+M_1C'-M_2C-M_2C'-M_2C''; & -LC-LC'-LC''-M_2C'-M_2C''; & LC'+M_1C-M_1C'-M_1C''-M_2C' \\ LC'+M_1C-M_1C'-M_1C''-M_2C''; & LC''+M_1C''-M_2C-M_2C'-M_2C''; & -LC-LC'-LC''+M_1C'-M_2C' \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{1}$$

Matematický popis diskretizovaného vinutí je tvořen systémem parciálních diferenciálních rovnic hyperbolického typu čtvrtého řádu. V mé disertační práci předpokládám transformátor, který je osově symetrický. Elektromagnetické vazby mezi jednotlivými fázemi označené M vytvoří systém symetrických nediagonálních matic.

Pro řešení rozložení napětí podél vinutí transformátoru jsem použil metodu konečných diferencí.

Uvažovaný problém rozložení napětí podél vinutí cívky transformátoru lze popsat systémem parciálních diferenciálních rovnic (2), dále jen:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathbf{U} - \mathbf{CA} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{U} + \mathbf{KA} \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} \mathbf{U} - \mathbf{RC} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U} + \mathbf{RK} \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial t} \mathbf{U} = 0 \tag{2}$$

v $(0, T) \times (0, D)$, kde C, K a R jsou konstanty,

$$\mathbb{A} = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \tag{3}$$

je konstantní matice a $\mathbf{U}(t, x) : (0, T) \times (0, D) \rightarrow \mathbb{R}^3$ je neznámá funkce napětí.

Systém doplníme o Dirichletovy okrajové podmínky:

$$\begin{aligned}
\mathbf{U}(t, 0) &= \mathbf{U}_0(t) \times (0, D), \quad \text{v } (0, T), \\
\mathbf{U}(t, D) &= \mathbf{0}, \quad \text{v } (0, T),
\end{aligned} \tag{4}$$

kde \mathbf{U}_0 reprezentuje vstupní impuls a podmínka $\mathbf{U}(t,0) = \mathbf{U}_0(t,D) = 0$ je důsledkem uzemnění vodiče, a o počáteční podmínky:

$$\mathbf{U}(0,x) = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U}_0(0,x) = 0, \text{ v } (0,D). \quad (5)$$

Rovnici (2) diskretizujeme pomocí metody konečných diferencí. Buď $h > 0$ prostorový a $\tau > 0$ časový krok na výpočetní oblasti $(0,T) \times (0,D)$, $x_i = ih$, $i = 0, \dots, N_x$ prostorové uzly a $t_k = k\tau$, $k = 0, \dots, M_t$, časové uzly. V dalším označíme aproximaci $\mathbf{U}_i^k \approx \mathbf{U}(t_k, x_i)$. Jednotlivé členy z rovnice (2) v bodě (t_k, x_i) aproximujeme pomocí diferencí následujícím způsobem:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathbf{U}_i^k &\approx \frac{1}{h^2} (\mathbf{U}_{i-1}^k - 2\mathbf{U}_i^k + \mathbf{U}_{i+1}^k), \\ \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{U}_i^k &\approx \frac{1}{\tau^2} (\mathbf{U}_i^k - 2\mathbf{U}_i^{k-1} + \mathbf{U}_i^{k-2}), \\ \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U}_i^k &\approx \frac{1}{\tau} (\mathbf{U}_i^k - \mathbf{U}_i^{k-1}), \\ \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial t} \mathbf{U}_i^k &\approx \frac{1}{\tau} \left[\frac{1}{h^2} (\mathbf{U}_{i-1}^k - 2\mathbf{U}_i^k + \mathbf{U}_{i+1}^k) - \frac{1}{h^2} (\mathbf{U}_{i-1}^{k-1} - 2\mathbf{U}_i^{k-1} + \mathbf{U}_{i+1}^{k-1}) \right], \\ \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} \mathbf{U}_i^k &\approx \frac{1}{\tau^2} \left[\frac{1}{h^2} (\mathbf{U}_{i-1}^k - 2\mathbf{U}_i^k + \mathbf{U}_{i+1}^k) - \frac{2}{h^2} (\mathbf{U}_{i-1}^{k-1} - 2\mathbf{U}_i^{k-1} + \mathbf{U}_{i+1}^{k-1}) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{h^2} (\mathbf{U}_{i-1}^{k-2} - 2\mathbf{U}_i^{k-2} + \mathbf{U}_{i+1}^{k-2}) \right], \end{aligned} \quad (6)$$

kde $i = 1 \dots N_x - 1$ a $k = 2 \dots M_t$.

Dosazením aproximace do (2), dostaneme pro každé $k = 2 \dots M_t$, $i = 1 \dots N_x - 1$ lineární soustavu:

$$d_{i-1}^k \mathbf{U}_{i-1}^k + d_i^k \mathbf{U}_i^k + d_{i+1}^k \mathbf{U}_{i+1}^k = F(\mathbf{U}_{i-1}^{k-1}, \mathbf{U}_i^{k-1}, \mathbf{U}_{i+1}^{k-1}, \mathbf{U}_{i-1}^{k-2}, \mathbf{U}_i^{k-2}, \mathbf{U}_{i+1}^{k-2}) \quad (7)$$

kde d_{i-1}^k , d_i^k a d_{i+1}^k jsou matice koeficientů a F je vektorová funkce (závislá na předchozích časových vrstvách). Soustavu lze řešit vhodnou metodou pro řešení soustav lineárních rovnic (například Gaussovou eliminační metodou).

Rozklad matice \mathbb{A} a definování nového problému

Roznásobením matice \mathbb{A} a vektoru neznámých \mathbf{U} dostaneme z (2) 3 rovnice obsahující všechny 3 složky neznámé funkce \mathbf{U} v každé rovnici. Pokud se nám povede rozložit matici \mathbb{A} jako $\mathbb{A} = \mathbb{Q}\mathbb{E}\mathbb{Q}^{-1}$, kde \mathbb{E} je diagonální matice s vlastními čísly \mathbb{A} na diagonále a \mathbb{Q} je matice rotace vytvořená z vlastních vektorů \mathbb{A} , půjde systém rovnic (2) po vynásobení maticí \mathbb{Q}^{-1} zleva rozepsat do tří rovnic, jenž každá bude obsahovat jen jednu složku neznámé funkce \mathbf{U} , a půjde tedy každá rovnice řešit zvlášť. Vlivem této vlastnosti půjde v kontextu zvolené numerické metody rozepsat systém (7) do tří rovnic, kde každá z nich bude obsahovat pouze jednu složku neznámé funkce \mathbf{U} .

Rozklad matice \mathbb{A} :

Vlastní čísla matice \mathbb{A} jsou:

$$\lambda_{1,2} = L - M \quad \lambda_3 = L + 2M \quad (8)$$

a odpovídající vlastní vektory jsou:

$$\mathbf{v}_1 = (-1, 1, 0)^T, \quad \mathbf{v}_2 = (0, 1, -1)^T, \quad \mathbf{v}_3 = (1, 1, 1)^T \quad (9)$$

Potom platí:

$$\mathbb{A} = \mathbb{Q} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \mathbb{Q}^{-1}, \quad \text{kde} \quad (10)$$

$$\mathbb{Q} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}, \quad \mathbb{Q}^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{2\sqrt{2}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ \frac{\sqrt{2}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{3} & -\frac{2\sqrt{2}}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

Přičemž sloupce matice \mathbb{Q} jsou tvořeny ortonormalizovanými vlastními vektory.

V dalším textu budu značit:

$$\mathbb{E} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Nyní vynásobíme soustavu (2) maticí \mathbb{Q}^{-1} zleva a dostaneme:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathbb{Q}^{-1} \mathbf{U} - C \mathbb{E} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbb{Q}^{-1} \mathbf{U} + K \mathbb{E} \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} \mathbb{Q}^{-1} \mathbf{U} - RC \frac{\partial}{\partial t} \mathbb{Q}^{-1} \mathbf{U} + \\ RK \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial t} \mathbb{Q}^{-1} \mathbf{U} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Zadefinoval jsem novou neznámou $\mathbf{W} := \mathbb{Q}^{-1}\mathbf{U}$, pro kterou platí následující rovnice:

$$\mathbf{W} = (W_1, W_2, W_3) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} W_1 - C(L - M) \frac{\partial^2}{\partial t^2} W_1 + K(L - M) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} W_1 - RC \frac{\partial}{\partial t} W_1 + \\ RK \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial t} W_1 = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} W_2 - C(L - M) \frac{\partial^2}{\partial t^2} W_2 + K(L - M) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} W_2 - RC \frac{\partial}{\partial t} W_2 + \\ RK \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial t} W_2 = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} W_3 - C(L + M) \frac{\partial^2}{\partial t^2} W_3 + K(L + M) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial t^2} W_3 - RC \frac{\partial}{\partial t} W_3 + \\ RK \frac{\partial^3}{\partial x^2 \partial t} W_3 = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

v $(0, T) \times (0, D)$, doplněné o počáteční a okrajové podmínky:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}(t, 0) &= \mathbb{Q}^{-1}\mathbf{U}_0(t) && \text{v } (0, T) \\ \mathbf{W}(t, D) &= 0 && \text{v } (0, T) \\ \mathbf{W}(0, x) &= \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{W}(0, x) = 0 && \text{v } (0, D) \end{aligned} \quad (18)$$

Dosadíme aproximace (6) do rovnic (15–17) a pro $k = 2, \dots, M_t$ a $i = 1, \dots, N_x - 1$ a $\alpha = 1, 2, 3$ dostaneme tridiagonální soustavu:

$$d_\alpha^0 W_{\alpha, i-1}^k + d_\alpha^1 W_{\alpha, i}^k + d_\alpha^0 W_{\alpha, i+1}^k = \beta_{\alpha, i}^k, \quad (19)$$

kde:

$$d_\alpha^0 = \frac{1}{h^2} + \frac{1}{h^2} \frac{1}{\tau} K(L - M) + \frac{1}{h^2} \frac{1}{\tau} RK \quad \alpha = 1, 2 \quad (20)$$

$$d_\alpha^1 = -\frac{2}{h^2} - \frac{1}{\tau^2} C(L - M) - \frac{2}{h^2} \frac{1}{\tau} K(L - M) - \frac{1}{\tau} RC - \frac{2}{h^2} \frac{1}{\tau} RK$$

(4.49)

$$d_3^0 = \frac{1}{h^2} + \frac{1}{h^2} \frac{1}{\tau} K(L + 2M) + \frac{1}{h^2} \frac{1}{\tau} RK \quad \alpha = 1, 2 \quad (21)$$

$$d_3^1 = -\frac{2}{h^2} - \frac{1}{\tau^2} C(L + 2M) - \frac{2}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L + 2M) - \frac{1}{\tau} RC - \frac{2}{h^2} \frac{1}{\tau} RK$$

$$\beta_{\alpha, i}^k = -W_{\alpha, i-1}^{k-1} \left(-\frac{2}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L - M) - \frac{1}{h^2} \frac{1}{\tau} RK \right)$$

$$-W_{\alpha, i}^{k-1} \left(\frac{2}{\tau^2} C(L - M) + \frac{4}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L - M) + \frac{1}{\tau} RC + \frac{2}{h^2} \frac{1}{\tau} RK \right)$$

$$\begin{aligned}
& -W_{\alpha,i+1}^{k-1} \left(-\frac{2}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L-M) - \frac{1}{h^2} \frac{1}{\tau} RK \right) \\
& -W_{\alpha,i-1}^{k-2} \left(\frac{1}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L-M) \right) \\
& -W_{\alpha,i}^{k-2} \left(-\frac{1}{\tau^2} C(L-M) - \frac{2}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L-M) \right) \\
& -W_{\alpha,i+1}^{k-2} \left(\frac{1}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L-M) \right) \qquad \alpha = 1,2 \\
\beta_{3,i}^k &= -W_{3,i-1}^{k-1} \left(-\frac{2}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L+2M) - \frac{1}{h^2} \frac{1}{\tau} RK \right) \\
& -W_{3,i}^{k-1} \left(\frac{2}{\tau^2} C(L+2M) + \frac{4}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L+2M) + \frac{1}{\tau} RC + \frac{2}{h^2} \frac{1}{\tau} RK \right) \\
& -W_{3,i+1}^{k-1} \left(-\frac{2}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L+2M) - \frac{1}{h^2} \frac{1}{\tau} RK \right) \\
& -W_{3,i-1}^{k-2} \left(\frac{1}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L+2M) \right) \\
& -W_{3,i}^{k-2} \left(-\frac{1}{\tau^2} C(L+2M) - \frac{2}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L+2M) \right) \\
& -W_{3,i+1}^{k-2} \left(\frac{1}{h^2} \frac{1}{\tau^2} K(L+2M) \right) \qquad (22)
\end{aligned}$$

Celkem dostanu pro každé $\alpha = 1,2,3$ a pro každou časovou vrstvu $k = 2, \dots, M_t$ soustavu lineárních rovnic. Rovnici (13) jsem přepsal v maticovém tvaru a řešil Gaussovou eliminační metodou.

$$\begin{bmatrix}
d_\alpha^1 & d_\alpha^0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\
d_\alpha^0 & d_\alpha^1 & d_\alpha^0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\
0 & d_\alpha^0 & d_\alpha^1 & d_\alpha^0 & 0 & \dots & 0 \\
\dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
0 & \dots & 0 & d_\alpha^0 & d_\alpha^1 & d_\alpha^0 & 0 \\
0 & \dots & 0 & 0 & d_\alpha^0 & d_\alpha^1 & d_\alpha^0 \\
0 & \dots & 0 & 0 & 0 & d_\alpha^0 & d_\alpha^1
\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_{\alpha,1}^k \\ W_{\alpha,2}^k \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ W_{\alpha,N-1}^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{\alpha,1}^k - d_\alpha^0 W_{\alpha,0}^k \\ \beta_{\alpha,2}^k \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \beta_{\alpha,N-1}^k \end{bmatrix} \qquad (23)$$

Po vyřešení této soustavy zbývá rekonstruovat napětí \mathbf{U} z vypočítaného řešení \mathbf{W} pomocí identity $\mathbf{U} = \mathbf{Q}\mathbf{W}$, což v diskretní formě znamená, že

aproximace \mathbf{U} v bodě (t_k, x_i) je dána součinem \mathbb{Q} a vektoru \mathbf{W} v bodě (t_k, x_i) .

Řetězení jednovrstvé cívky

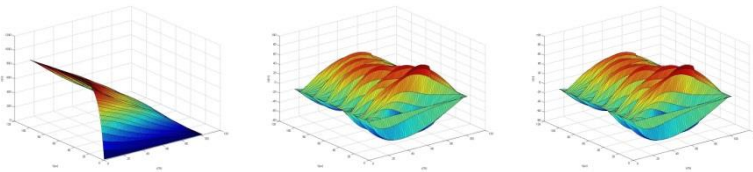
Jedná se o identický problém, jako v případě řešení rozložení napětí podél axiální osy vinutí transformátoru, tj. formulace i řešení jsou ve všech ohledech stejné. Jedinou výjimku tvoří konstanty L, M, C, K, R vystupující v rovnici, které nyní uvažuji jako po částech konstantní funkce (tj. nespojitě). Stejným způsobem jsem použil numerickou aproximaci (5), rozklad matice \mathbb{A} a převedl jsem tak úlohu na rovnice (15–17) jako u jednoduché cívky. Identickým způsobem dostanu rovnici:

$$d_{\alpha}^0 W_{\alpha,i-1}^k + d_{\alpha}^1 W_{\alpha,i}^k + d_{\alpha}^0 W_{\alpha,i+1}^k = \beta_{\alpha,i}^k, \quad (24)$$

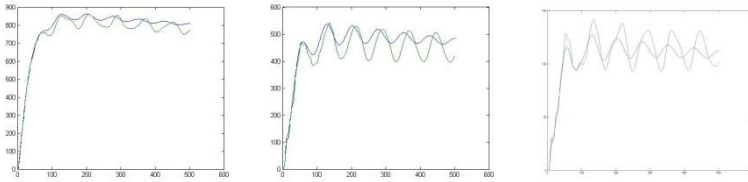
kde uvedené koeficienty jsou po částech konstantní funkce. Body prostorové diskretizace ležící v první cívce budou násobeny koeficienty odpovídající první cívce a analogicky tak pro body druhé cívky, atd. Musí se pouze zajistit, aby nespojitost v koeficientech nevycházela přesně do některého prostorového uzlu.

4. VÝSLEDKY

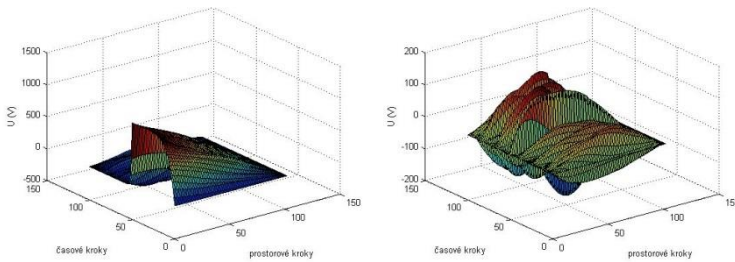
K řešení numerické metody popsaného systému jsem použil programového vybavení Matlab R2012b. Namodelované výsledky jsem komparoval s měřeními na modelu transformátorového vinutí pro jednotlivé konfigurace trojfázových zapojení cívek. Jako příklad uvádím:



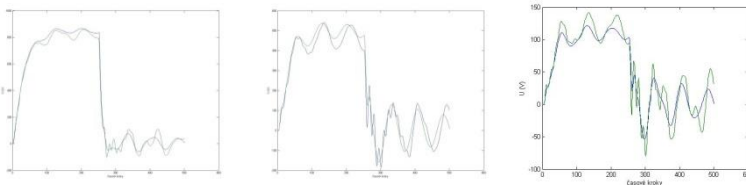
Obrázek 2 – Ukázka jednopólového nárazu plným impulzem $1,2/50 \mu\text{s}$ u trojfázového transformátoru zapojeného do hvězdy s uzemněným uzlem vinutí do fáze U_a , indukované napětí ve fázi U_b, U_c



Obrázek 3 – Ukázka jednopólového nárazu plným impulzem $1,2/50 \mu\text{s}$ u trojfázového transformátoru zapojeného do hvězdy s uzemněným uzlem vinutí do fáze U_a – zeleně namodelované výsledky, modře naměřené, (měřeno v 6tém, 18tém a 30tém závitu)



Obrázek 4 – Jednopólový náraz useknutým impulzem $1,2/50 \mu\text{s}$ v čase $3 \mu\text{s}$ u trojfázového transformátoru zapojeného do hvězdy s uzemněným uzlem vinutí do fáze U_a , indukované napětí ve fázi U_b , U_c



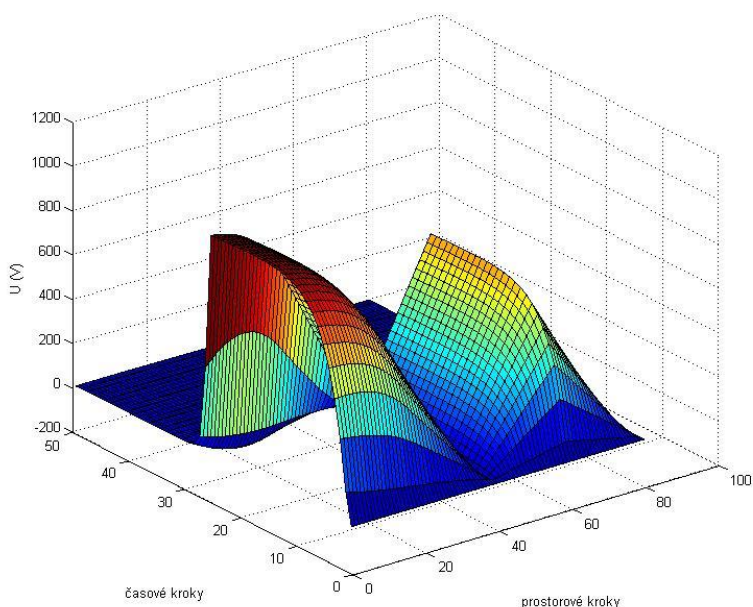
Obrázek 5 – Jednopólový náraz useknutým impulzem $1,2/50 \mu\text{s}$ v čase $3 \mu\text{s}$ u trojfázového transformátoru zapojeného do hvězdy s uzemněným uzlem vinutí do fáze U_a – zeleně namodelované výsledky, modře naměřené (měřeno v 6tém, 18tém a 30tém závitu)

Obdobným způsobem byly zpracovány naměřené a namodelované výsledky pro zapojení s uzemněným a neuzemněným uzlem vinutí, konfigurace

zapojení do hvězdy a do trojúhelníku a aplikován plný impulz $1,2/50 \mu\text{s}$, useknutý normalizovaný impulz v čase $3 \mu\text{s}$ a spínací vlny $1000/1050 \mu\text{s}$.

Metodu ověřenou pro jednovrstvou cívku jsem rozšířil na reálná vícevrstvá válcová vinutí a na problem jejich řetězení. Metoda je detailně popsána v disertační práci.

Jako příklad uvádím rozložení napětí na dvojčívce transformátorového vinutí



Obrázek 6 – Časoprostorové rozložení napětí trojfázového transformátoru s uzemněným uzlem naráženého do všech fází jedné dvojčívky

5. ZÁVĚR

Cílem disertační práce bylo navrhnout a ověřit metodu pro zjišťování rozložení přepětového impulzu podél vinutí axiální osy transformátoru. Základním stavebním kamenem se stal element délkového vinutí navrženého K. W. Wagnerem, ale ten posloužil pouze jako vstupní představa o možnosti chápání vinutí jako obvodu s rozprostřenými parametry. V rámci práce jsem

sestavil model trojfázového dvojvinutového transformátoru, který kromě klasických příčných (C) a podélných (K, L a R) prvků respektoval také vliv vzájemné magnetické vazby (M) mezi jednotlivými fázemi a akceptoval i vzájemnou indukčnost mezi jednotlivými závity a kapacitní vazby s ostatními fázemi. Pro takto složený model jsem sestavil analytické vyjádření, pro které jsem zvolil numerickou metodu založenou na principu konečných diferencí v devítibodovém schématu.

Řešením jsem dostal možnost analyzovat jednoduchou válcovou cívku s konstantními koeficienty a zjišťovat rozložení impulzního napětí v kterémkoliv délkovém elementu vinutí. V návaznosti na tento primární problém jsem rozšířil představu o potřebu plynulého řetězení cívek, které nemají konstantní parametry a jsou řetězeny do sériových vazeb. Řešení přineslo eventualitu analyzovat kotoučové cívky, které jsou spojeny sériovou propojkou, ale neakceptoval jsem u nich vzájemné ovlivnění.

Po ověření použitelnosti numerické metody jsem se v dalších částech práce zaměřil na analýzu vinutí, která je různými metodami odolnější vůči impulznímu namáhání. Jednalo se o cívky využívající principu vrstvení jednotlivých závitů. A to buď do vazby, která tvoří těsný nerozebíratelný celek vinutí realizovaný přímým navinutím z několika vrstev izolovaného vodiče, kdy vodič je po vrstvách navíjen od začátku vinutí ke konci a opět od konce k počátku. Takto realizované vinutí se u VN transformátorů příliš nepoužívají, protože převládají u transformátorů pro malé výkony a specifické aplikace. Nebo byl vytvořen důležitější model vinutí, respektující reálnou situaci vícepolohového rozložení, které je navíjeno po částech ve válcích, kdy vždy konec jedné cívky navazuje na začátek nové vrstvy. Tento model zahrnuje nejreálnější představu o celkovém akceptování parametrů vinutí transformátoru. Všechny modely jsou konstruovány tak, aby byly rozšiřitelné pro konkrétní transformátor. Aplikace, pro které jsou VN transformátory konstruovány, neumožňují vytvoření univerzální metody, postihující všechny vazby. Analýza odolnosti transformátorového vinutí vůči přepětí tak podléhá modelování dílčích částí, které se musí vhodným způsobem propojit.

Hlavní přínos disertační práce kromě numerického řešení diferenciálních parciálních rovnic dosahujícího čtvrtého řádu hyperbolického typu, na které model vede, vidím především v reálnějším přístupu k transformátorovému vinutí, než bylo dosud možné za pomoci vyjádření pouze počátečního a koncového rozložení napětí modelovaného pro jednotkový impulz.

V práci akceptuji tři možné stavy napětového impulsu – krátký atmosférický impuls (normalizovaný impuls 1,2/50), dlouhý (spínací) impuls a jako poslední příklad aplikuji useknutý impuls v týlu po době 3 μ s. Useknutý impuls jsem využil především pro transformátory, které jsou chráněny před přímou přepětovou vlnou některým z mnoha typů omezovačů. V disertační práci jsem používal reálná konstrukční data transformátorů, ze kterých jsem sestavoval modely a ověřoval jejich řešitelnost.

V poslední části disertační práce jsem ověřoval chybu numerického řešení založené na principu půlení intervalu. Na jejím základě jsem se všechny tři hlavní modely snažil optimalizovat a výsledky jsou prezentovány v souhrnné tabulce.

Výsledky práce jsem se snažil ověřit měřeními na modelu reálného transformátorového vinutí. Výsledky této části práce přinášejí s ohledem na složitost validního snímání rozložení napětí podél axiální osy transformátoru spíše informativní poznatky. Mým cílem nebylo prohlubovat experimentální metody ověřování rozložení napětí podél vinutí. Obtížnost získání správných výsledků měřeními vidím především v mnoha restrikcích, které ověřování provázejí. Patří k nim určitě nutnost vytažení vinutí transformátoru z nádoby (odstranění skutečného prostředí – například oleje, zároveň odstranění uzemněného obalu), omezení se na nebandážované body, omezení počtu snímacích bodů (počtem kanálů osciloskopu), nemožnost používání vysokých hladin zkušebního napětí, atd.

Model je citlivý na vstupní data, která ovlivňují podmíněnost matic pro numerická řešení. V celém modelu jsou akceptovány parazitní prvky, jejichž hodnoty se řádově pohybují v rozmezí 10^{-6} – 10^{-13} . Okrajově jsem se v práci věnoval i determinaci těchto parametrů, i když většina navržených metod je zatížena chybou. V této práci jsem vycházel při jejich určování z postupů, které byly čerpány z odborné literatury posledních deseti let.

Pro zlepšení odolnosti transformátorů vůči přepětí jsem sledoval význam nastavení poměru kapacity podélné a příčné a modelem dokládám možnost jejich optimalizace do lineárního rozložení bez vnitřních kmitů.

Předložená disertační práce si neklade za cíl být vyčerpávající studií problematiky ochrany transformátorových vinutí před přímými účinky přepětí, ale poskytuje stabilní model, který může být komerčně využíván při ověřování odolnosti již hotových vinutí před přepětím, respektive může pomoci již při samotném projektování a konstrukci.

Výběrový seznam v tezích použité literatury

Odborné monografie k problematice impulzního namáhání

- [1] HARLOW, J. H. *Electric Power Transformer Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 143985629X.
- [2] HELLER, B., VEVERKA, A. *Surge phenomena in electrical machines*. Prague: Academia, 1968.
- [3] JEZERSKI, E. *Transformátory: teoretické základy*. Praha: Academia, 1973.
- [4] KARSAI, K., KERÉNYI, D. and KISS, L. *Large Power Transformers* Budapest: Akadémiai Kiadó, 1987.
- [5] KULKARNI, S. V., KHAPARDE S. A. *Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics*. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 9781439853771.
- [6] MAYER, D. *Elektrodynamika v energetice*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-164-0.

Odborné monografie k problematice aplikovaného numerického řešení

- [7] MOIN, P. *Fundamentals of Engineering Numerical Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 0521711231.
- [8] RILEY, K. F., HOBSON, M. P. *Essential Mathematical Methods for the Physical Sciences*. Cambridge. New York: Cambridge University Press, 2011. ISBN 1139492942.
- [9] VITÁSEK, E. *Základy teorie numerických metod pro řešení diferenciálních rovnic*. Praha: Academia, 1994. ISBN 80-200-0281-2.

Odborné původní časopisecké příspěvky

- [10] BABIC, S., AKYEL, C. Improvement in Calculation of the Self- and Mutual Inductance of Thin-Wall Solenoids and Disk Coils. *IEEE Transactions on Magnetics*, July 2000, vol. 36, No. 4, pp. 1970–1975. ISSN 0018-9464. DOI 10.1109/TMAG.2000.875240.
- [11] BAGHERI, M., HEKMATI, A., HEIDARZADEH, R., NADERI, M. S. Impulse Voltage Distribution in Intershield Disk Winding VS Interleaved and Continuous Disk Winding in Power Transformer. *2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon '08)*, December 1–3, Johor Baharu, Malaysia 2008, pp. 387–392. ISSN 978-1-4244-2405-4. DOI 10.1109/PECON.2008.4762505.

- [12] BAK, C. L., EINARSDÓTTIR, K. E., ANDRESSON, E., RASMUSSEN, J. M., LYKKEGAARD, J., WIECHOWSKI, W. Overvoltage Protection of Large Power Transformers – A Real-Life Study Case. *IEEE Transactions on Power Delivery*, April 2008, vol. 23, No. 2, pp. 657–666. ISSN 0885-8977. DOI 10.1109/TPWRD.2007.905793.
- [13] DELLA TORRE, F., MORANDO, A. P., TODESCHINI, G. Three-Phase Distributed Model of High-Voltage Windings to Study Internal Steep-Fronted Surge Propagation in a Straightforward Transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, October 2008, vol. 23, No. 4, pp. 2050–2057. ISSN 0885-8977. DOI 10.1109/TPWRD.2008.923102.
- [14] FUJITA, S., HOSOKAWA, N., SHIBUYA, Y. Experimental Investigation of High Frequency Voltage Oscillation in Transformer Winding. *IEEE Transaction on Power Delivery*, October 1998, vol. 13, No. 4, pp. 1201–1207. ISSN 0885-8977 DOI 10.1109/61.714485.
- [15] GHAREHPETIAN, G. B., MOHSENI, H., MÖLLER, K. Hybrid Modelling of Inhomogeneous Transformer Winding for Very Fast Transient Overvoltage Studies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, January 1998, vol. 13, No. 1, pp. 157–163. ISSN 0885-8977. DOI 10.1109/61.660873.
- [16] GURUMURTHY, G. R., ANSARI, M. Z. A., AMARNATH, J. Reduction of Voltage Stresses in Power Transformer Windings Due to Surges. *2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP '05)*, 2005, pp. 51–54. ISBN 0-7803-9257-4. DOI: 10.1109/CEIDP.2005.1560618.
- [17] HOOGENDORP, G., POPOV, M., VAN DER SLUIS, L. Application of Hybrid Modeling for Calculating Interturn Voltages in Transformer Windings. *IEEE Transactions on Power Delivery*, July 2009, vol. 24, No. 3, pp.1742–1744. ISSN 0885-8977. DOI 10.1109/TPWRD.2009.2021021.
- [18] LI, Y., LIU, G., ZHANG, L., LIN, Z. Transformer Winding Deformation Diagnosis Using Middle Band Frequency Response Analysis. *IEEE International Conference on Solid Dielectric (ICSD '07)*, UK 2007, pp. 677–680. ISSN 1-4244-0751-6. DOI 10.1109/ICSD.2007.4290904.
- [19] MASSARINI, A., KAZIMIERCZUK, K., GRANDI, G. Lumped Parameter Models for Single- and Multiple-Layer Inductors. *Power Electronics Specialists Conference*, Juny 1996, vol. 1, No. 23–27, pp. 295–301. ISSN 0275-9306. DOI 10.1109/PESC.1996.548595.

- [20] MATĚNA, Š., HELLER, B. Contribution to the solution of surge propagation along transformer windings with all parameters. *Acta Technica ČSAV*, 1976, vol. 21, No. 4, pp. 459–477.
- [21] POPOV, M., SLUIS, van der L., PAAP, G. C., HERDT, De H. Computation of Very Fast Transient Overvoltages in Transformer Windings. *IEEE Transaction on Power Delivery*, October 2003, vol. 18, No. 4, pp. 1268–1274. ISSN 0885-8977. DOI 10.1109/TPWRD.2003.817738.
- [22] WAGNER, Karel Willy. *Das eindringen einer elektromagnetischen welle in eine spule mit windungskapazität*. Elektrotechnische Maschinen-Bau, 1915 (in German).

Seznam prací disertanta vztahujících se k disertační práci:

Publikace v impaktovaných časopisech

- [P1] MIKEŠ, J., KOKEŠ, D. Arrangements of transformer winding with a view to impulse stress. *Journal of Electrostatics*. 2013, vol. 71, no. 3, pp. 533–539. ISSN 0304-3886. DOI 10.1016/j.elstat.2012.12.015.

Publikace v recenzovaných časopisech

- [P2] MIKEŠ, J., KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., PETRÁK, M. Biogas Plant Explosion Protected Early Streamer Emission (ESE) Air Terminal. *Elektro*. 2011, vol. 21, no. 11, pp. 23–26. ISSN 1210-0889. (in Czech and English).
- [P3] KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., MIKEŠ, J., ČERNOCH, D. A New Hotel "Protected" by Air-Termination System ESE Goes Up In Flames. *Elektro*. 2012, vol. 22, no. 8–9, pp. 82–85. ISSN 1210-0889. (in Czech and English).
- [P4] MIKEŠ, J., SZEDENIK, N., et al. The Impact of Active Conductors on Czech and Hungarian Lightning Protection Legislation. *Acta Polytechnica (Journal of Advanced Engineering)*. 2013, vol. 53, no. 4, 9 pp. manus. – in press. ISSN 1210-2709 (print), ISSN 1805-2363 (online).
- [P5] MIKEŠ, J., KREIBICH, O., NEUŽIL, J. Lightning conductor monitoring system based on a wireless sensor network. *Acta Polytechnica (Journal of Advanced Engineering)*. 2013, vol. 53, no. 5, 10 pp. manus. – in press. ISSN 1210-2709 (print), ISSN 1805-2363 (online).

- [P6] MIKEŠ, J. et al. Protection Against Lightning by Means of ESE Collector and its Influence on the Protection of an Historical Monument. *All for Power*. 2013, vol. VII, no. 2, pp. 94–97. ISSN 1802-8535 (in Czech and English).
- [P7] MIKEŠ, J., MAROUSEK, M., Důsledky nevhodné volby ochrany před přímým zásahem blesku ve specifickém prostředí – fotovoltaická elektrárna Rodvínov u Jindřichova Hradce (případová studie). *All for Power*. 2013, vol. VII, no. 4, in press. ISSN 1802-8535 (in Czech and English).

Normy

MIKEŠ, J., KUTÁČ, J. Překlad z angličtiny a zavedení souboru norem *Ochrana před bleskem v ČR*:

- [P8] ČSN EN 62305-1 (34 1390) Ochrana před bleskem Část 1 Obecné předpisy ČSN EN 62305-2 (34 1390) Ochrana před bleskem Část 2 Řízení rizika ČSN EN 62305-3 (34 1390) Ochrana před bleskem Část 3 Hmotné škody na stavbách a nebezpečí života ČSN EN 62305-4 (34 1390) Ochrana před bleskem Část 4 Elektrické a elektronické systémy ve stavbách

Počítačový program

- [P9] PANKRÁC, V., MIKEŠ, J. Computer Program for Calculate the Mechanical Stress of Air Coils During Short-circuit. [Software splňující podmínky RIV]. 2010. (in Czech).

Publikace v konferenčních sbornících

- [P10] MIKEŠ, J., KVASNIČKA, V. Multi layer coin of high voltage transformer. *ELEN 2008*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2008, pp. 1–7. ISBN 978-80-254-2293-9. (in Czech).
- [P11] MIKEŠ, J., PROCHÁZKA, R. Modeling of the Surge Voltage Phenomenon in Transformer Windings. *8th International Conference Control of Power Systems '08. Štrbské Pleso, High Tatras, Slovak Republic*, 2008, pp. 1–8. ISBN 978-80-227-2883-6.
- [P12] PANKRÁC, V., MIKEŠ, J. Deformation Forces Stressing Winding of Heavy-duty Reactors During Short-circuit. *ELEN 2010*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2010, p. 1–12. ISBN 978-80-254-8089-2.

- [P13] MIKEŠ, J., KOKEŠ, D. A Study on the Protection of Transformer Winding Against Impulse Stress Using Lax-Wendroff Transformation. *ELEN 2012*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2012, pp. 1–7. ISBN 978-80-01-05096-5.

Odborné překlady:

- [P14] Lapp Cable Guide – Lexikon kabelové techniky. Lapp Group, Otrokovice 2010. 263 s. (překlad publikace z německého jazyka a její doplnění česko-anglickým výkladovým slovníkem, s. 147–263).
- [P15] CHRZAN, K. L., Izolátory se spirálovou stříškou. *Elektro*. 2006, vol. 16, no. 7, pp. 40–43. ISSN 1210-0889, (překlad z německého jazyka ve spolupráci s doc. Ing. V. Kvasničkou, CSc.).

Ostatní publikace

Publikace v impaktovaných časopisech

- [P16] MIKEŠ, J., EFMERTO VÁ, M. Development of Lightning Rod for Lightning Protection Standard in Europe, Especially in Czech Lands. *Journal of Electrostatics*. 2013, vol. 71, no. 3, pp. 597–601. ISSN 0304-3886. DOI: 10.1016/j.elstat.2012.12.016.
- [P17] MIKEŠ, J., Measurement and Modeling of Unconventional Lightning Conductors in the Czech Republic *Environmental Engineering and Management Journal*. 2013, opponency. ISSN 1582-9596.

Publikace v ostatních časopisech a sbornících

- [P18] MIKEŠ, J. Active lightning protection devices. *POSTER 2008 – 12th International Student Conference on Electrical Engineering*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2008, p. 1–7. ISBN 978-80-01-05043-9.
- [P19] MIKEŠ, J., KVASNIČKA, V., KLOUČEK, T. Physical Model of the Lightning Strike Into the Object (Building). *Diagnostika '09*. Plzeň Západočeská univerzita v Plzni, 2009, pp. 274–278. ISBN 978-80-7043-793-3. (in Czech).
- [P20] KNÁPEK, J., EFMERTO VÁ, M., MIKEŠ, J. Nuclear Energy in Czechoslovakia. An Outline and Description of Its Development Trends. *Annales historiques de l'électricité*. 2011, vol. V, no. 10, pp. 59–81. ISSN 1762-3227.

- [P21] MIKEŠ, J., KUTÁČ, J. Overvoltage Protection Technical Fundamentals of Lightning Rod. *Elektroinstalátér*. 2012, vol. 18, no. 1, pp. 47–49. ISSN 1211-2291. (in Czech).
- [P22] MIKEŠ, J., et all. The Influence of Lightning Rod Symmetrization on Overvoltage In Narrow Structures. Book of Abstract 2013 International Conference, on Lightning and Static Electricity, September 17–20, 2013, Seattle, USA.

Ohlasy

H-index 1

MIKEŠ, J., KUTÁČ, J., MARTÍNEK, Z., PETRÁK, M. Biogas Plant Explosion Protected Early Streamer Emission (ESE) Air Terminal. *Elektro*. 2011, vol. 21, no. 11, pp. 23–26. ISSN 1210-0889. [1x citováno – viz: BAZYLEAN E. M, CHRZAN K. L: Active lightning terminals. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012. ISSN 0033-2097.]

Podíl spoluautorství u všech uvedených publikací je dělen mezi jednotlivé autory vždy rovným dílem.

SUMMARY

The aim of the thesis is to design and test a method for determining the distribution of surge pulses along the winding axis of a transformer. The cornerstone of the work is the element of length winding proposed by K. W. Wagner, but this only served as an idea for understanding the winding as a circuit with distributed parameters. As part of the work I compiled a model of a three-phase dual-winding transformer, which in addition to conventional diagonal (C) and longitudinal (K, L and R) elements also respects the effect of mutual magnetic coupling (M) between the individual phases and accepts the mutual inductance of the coils and the capacitive coupling with other phases. For the model I formulated an analytical expression for which I have chosen a numerical method based on the principle of finite differences in a nine-point scheme.

This solution enabled me to analyze a simple cylindrical coil with a constant coefficient and to determine the distribution of the impulse voltage along any length of the element winding. In relation to this primary problem I expanded on the idea of the need to have continuous chaining coils, which do not have constant parameters and are chained to series links. The solution also enabled

me to analyze circular coils which are connected by a series jumper, but I did not accept their mutual interaction.

After verifying the applicability of the numerical method I focused in other parts of the work on an analysis of the winding, which is more resistant to pulse stress by using different methods. This is based on the principle of layering the individual coils into couplings, which form tight windings made by directly winding several layers of insulated wire, where the wire is wound in layers from the beginning of the winding to the end and back from the end to the beginning. This type of winding is not commonly used in HV transformers because they are more common in low power transformers and in specific applications, or a more important winding model is created respecting the real situation of a multi-position layout which is wound on reels, where the end of one coil is linked to the beginning of a new layer. This model provides the most realistic representation of the overall acceptance of the parameters of transformer winding. All of the models are designed to be modified for a specific transformer. The applications for which HV transformers are designed do not allow the creation of a universal method involving all of the couplings. The analysis of the resistance of transformer windings to surges was subject to the modeling of components which must be appropriately connected.

The main contribution of the thesis, besides the numerical solution of differential partial equations achieving a hyperbolic fourth order which is demonstrated by the model, is a more realistic approach to transformer windings than was previously possible using an expression of the start and end of the distribution stress modeled for a unit impulse.

In the work I accepted three possible states of voltage pulse - a short atmospheric pulse (normalized pulse 1.2/50), long (switching) pulse and as the last example I apply a clipped pulse at the back for a duration of 3 μ s. The clipped pulse is used mainly for transformers which are protected from a direct surge wave by one of the many types of limiters. In the thesis I used real transformer construction data, from which I compiled models and tested their solvability.

In the last part of the thesis I verified the error of the numerical solution based on the principle of interval bisection. On the basis of this I attempted to optimize all three main models and the results are presented in the summary table.

I have attempted to verify the results of the work by measuring them on a model of a real transformer winding. The results of this part of the work provide knowledge of an informative nature considering the complexity of measuring the stress distribution along the axial of the transformer. My aim was not to deepen the experimental methods for verifying the voltage distribution along the winding. The difficulty in obtaining the correct measurement results is mainly in the many restrictions that accompany the verification. These include the need to remove the transformer winding from the container (removing the actual environment - such as oil, while removing the grounded cover), restrictions with unwrapped points, limits in the number of measurement points (the number of oscilloscope channels), and inability to use high levels of test voltage, etc.

The model is sensitive to the input data which affect the conditionality of the matrices for the numerical solutions. The entire model accepts parasitic elements whose values are in the range of 10^{-6} – 10^{-13} . I paid a certain amount of attention to the determination of these parameters in the work, although most of the proposed methods are flawed. In this work, I used procedures taken from the scientific literature from the last ten years.

To improve the resistance of the transformer against surges I took into account the importance of setting the ratio of the longitudinal and diagonal capacity and using the model I demonstrated how to optimize them into a linear distribution without internal oscillations.

The presented thesis does not aim to be an exhaustive study of the issue of protection of transformer winding against the effects of surges, but to provide a stable model which can be commercially utilized to verify the resistance of ready-made windings to power surges or to support their design and construction.

KEYWORDS

high voltage transformers, power transformer protection, transformer windings, atmospheric discharge, voltage distribution, longitudinal capacitance of transformer winding, lateral capacitance of transformer winding, overvoltage, surge phenomenon, numerical solution, hyperbolic partial differential equations, finite difference method

RESUMÉ

Dynamické interakce ve vinutí transformátorů sledují buďto rozložení elektrického pole a přepětové jevy ve vinutí při vstupu impulzu, anebo rozložení silového pole a mechanické chování vinutí transformátorů při různých druzích zkratu. První označujeme jako rychlé, druhé jako pomalé. Práce se zabývá prvním typem interakcí.

Vyšetřování přepětových poměrů ve vinutí transformátorů bylo předmětem nesčetného počtu prací. Rozvíjející se poznatky v oblasti matematické analýzy a numerické matematiky umožnily postupné zpřesňování řešeného fyzikálního modelu. První práce vycházely z modelu jednovrstvé cívky bez železa (K. W. Wagner), který umožnil provádět jisté predikce analytickou cestou. Další studie (viz seznam literatury) pak pokračovaly ve složitějších fyzikálních modelech, k jejichž chování byly postupně zapojovány numerické metody. Avšak i moderní práce vycházejí z poměrně zjednodušené konfigurace fyzikálního modelu.

Předložená disertační práce se zabývá interakcí rychlých přepětových jevů odehrávajících se při přímém zásahu vinutí, respektive jeho části, bleskovým proudem nebo přepětím vzniklým v jeho důsledku. Analýza je provedena na modelech třífázových distribučních transformátorů.

Hlavním cílem mé disertační práce je sestavení přesnějšího matematického modelu, který by respektoval důsledněji souvislosti uvnitř transformátoru, přenesl získané vlastnosti jedné cívky na trojfázový dvojvinutíový transformátor, respektoval skutečnou geometrickou konfiguraci cívek a dokázal řešit jejich vrstvení.

KLÍČOVÁ SLOVA

vysokonapětové transformátory, ochrana výkonových transformátorů, transformátorová vinutí, atmosférický výboj, rozložení napětí, podélná kapacita transformátorových vinutí, příčná kapacita transformátorových vinutí, přepětí, impulzní namáhání, numerické řešení, hyperbolická parciální diferenciální rovnice, metoda sítí