

Rozloženie elektromagnetického poľa v okolí transformátora

Ján PRESADA, Dušan MEDVEĎ

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

jan.presada@student.tuke.sk, dusan.medved@tuke.sk

Abstrakt — Tento článok sa venuje rozloženiu elektromagnetického poľa v okolí transformátora. Transformátor je zariadenie, ktoré sa umiestňuje v bezpečnej vzdialenosti, teda je bežne umiestnené aj v okolí obydľí. Väčšina obyvateľov si ale neuvedomuje, že toto zariadenie môže mať negatívne účinky pre ich organizmus. Preto účely tohto príspevku, bolo zisťované a preskúmané rozloženie magnetického a elektrického poľa v okolí transformátora, pomocou špecializovaného softvéru.

Kľúčové slová — ANSYS, elektromagnetické pole, intenzita elektrického poľa, magnetická indukcia

I. ÚVOD

Elektromagnetické pole je zložené z elektrického a magnetického poľa, ktoré sú navzájom prepojené. Elektrické polia sú tvorené rozdielmi v napätí, čím vyššie napätie, tým silnejšie bude výsledné pole. Magnetické polia vznikajú pri prúde elektrického prúdu: čím väčší je prúd, tým silnejšie je magnetické pole. Elektrické pole bude existovať aj vtedy, keď nebude prúdiť prúd. Ak prúd prúdi, intenzita magnetického poľa sa bude líšiť podľa toku energie, ale intenzita elektrického poľa bude konštantná. Elektromagnetické polia sú prítomné všade v našom prostredí, ale pre ľudské oko sú väčšinou neviditeľné. Elektrické polia sú vytvárané lokálnym hromadením elektrických nábojov v atmosfére spojenej napr. s búrkami. Magnetické pole Zeme spôsobuje, že ihla kompasu sa orientuje v smere sever-juh a používajú ju na navigáciu vtáky a ryby. Okrem prírodných zdrojov zahŕňajú elektromagnetické spektrum aj polia vytvorené ľudskými zdrojmi: röntgenové lúče sa používajú na diagnostiku zlomenej končatiny po športovej nehode. Elektrická energia, ktorá prichádza z každej zásuvky, má prepojené nízkofrekvenčné elektromagnetické polia. Na prenos informácií sa používajú rôzne druhy vysokofrekvenčných rádiových vln, či už prostredníctvom televíznych antén, rádiových staníc alebo základňových staníc mobilných telefónov.

II. VZNIK ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ

Jednosmerné elektrické pole je vytvorené rozdielom potenciálov napríklad medzi dvomi doskami s rozdielnym elektrickým potenciálom a statické magnetické pole sa vytvára v okolí permanentných magnetov alebo v blízkosti elektrických vodičov, ktorými pretekajú jednosmerné prúdy. Striedavé elektrické a magnetické pole v prostredí sa vytvorí v okolí elektrických zariadení, ktorými pretekajú striedavé prúdy napr. takými zariadeniami sú transformátory, tlmivky a podobne.

Elektromagnetické striedavé polia v prostredí sú vytvorené elektromagnetickými vlnami s rôznymi vlnovými dĺžkami a sú dané veľkosťou a smerom elektrickej a magnetickej zložky. V prípade, že vektory elektrickej a magnetickej zložky poľa sú navzájom kolmé a ležia v rovine kolmej na smer šírenia vlny, hovoríme o rovinnej vlne.

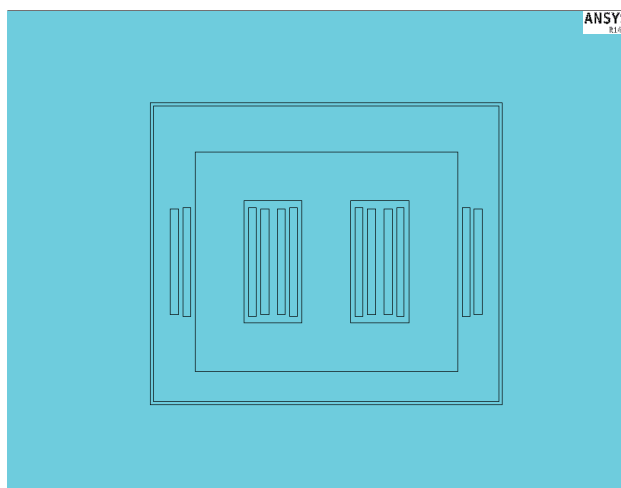
Z pohľadu vzdialenosti od zdroja, pri šírení a posudzovaní elektromagnetických polí, sa delí priestor na dve oblasti:

1. oblasť blízkeho poľa
2. oblasť vzdialeného poľa

Oblasť blízkeho poľa sa nachádza do vzdialenosti 3-násobku vlnovej dĺžky a v tejto oblasti sa vyhodnocuje samostatne elektrická a magnetická zložka poľa, pretože jednotlivé zložky poľa nie sú vzájomne prepojené. [1]

III. ROZLOŽENIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POĽA V OKOLÍ TRANSFORMÁTORA

Transformátory sú elektrické zariadenia pozostávajúce z dvoch alebo viacerých vinutí, ktoré sa používajú na transformáciu parametrov elektrickej energie (U , I) prostredníctvom meniaceho sa magnetického poľa. Patria medzi najdôležitejšie zariadenia prenosovej a distribučnej sústavy. Skladajú sa z magnetického jadra, primárneho a sekundárneho vinutia. Simulácie boli zamerané na trojfázový transformátor, ktorého rez je uvedený na Obr. 1 (bol využitý nástroj ANSYS, APDL). Načrtnúť geometriu skutočného transformátora by bolo obtiažné a komplikované, preto bol využitý zjednodušený 2D model.



Obr. 1 Model transformátora

Jedná sa o trojfázový transformátor chladený olejom so zdanlivým výkonom 150 kVA, s hodnotou primárneho vinutia $U_1 = 10\,500\text{ V}$ a s hodnotou sekundárneho vinutia $U_2 = 400\text{ V}$. Veľkosť prúdu na primárnom vinutí je $I_1 = 8,24\text{ A}$ a na sekundárnom vinutí je $I_2 = 217,4\text{ A}$. Počet závitov na vysokonapäťovej strane je 1150 a na nízkonapäťovej strane 26. Z jednotlivých parametrov boli vypočítané potrebné hodnoty veličín, ktoré sú nevyhnutné pri simulácii.

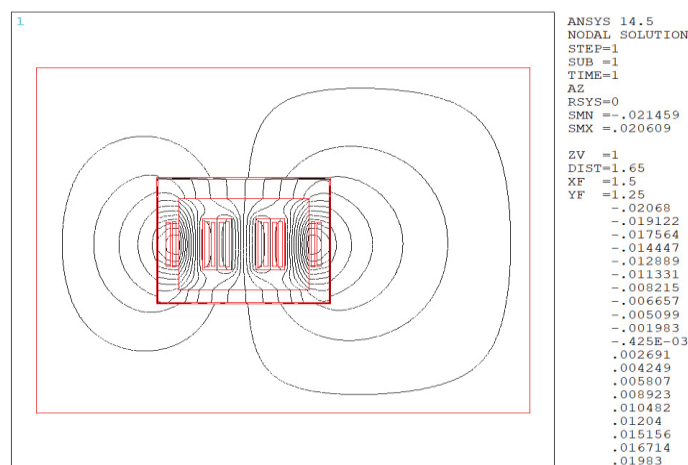
A. Magnetické pole

Pri simulácii magnetického poľa v okolí transformátora bolo potrebné zadať hodnoty relatívnych permeabilit jednotlivých materiálov, ktoré sú uvedené v (Tab. 1). Následne, po vytvorení geometrie a sieťovania, bolo potrebné vypočítať hustotu prúdu J , ktorá bola získaná z údajov prúdov a závitov, uvedených vyššie. Hodnoty hustôt prúdov, ktoré boli určené výpočtom, sú nasledovné: pre primárne vinutie $J_1 = 1\,200\,000\text{ A/m}^2$ a pre sekundárne vinutie $J_2 = 747\,000\text{ A/m}^2$. Tieto hodnoty boli zadané do programu na jednotlivých vinutiach. Posledným krok bol výpočet a vyhodnotenie rozloženia magnetického poľa.

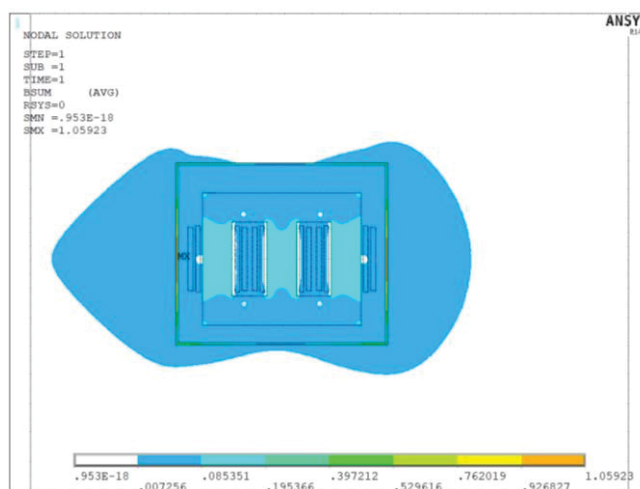
TABUĽKA 1
 Hodnoty relatívnych permeabilit jednotlivých materiálov

Materiály	Relatívna permeabilita μ_r (-)
Vzduch	1,05
Transformátorový plech	3000
Hliník	1,00002
Kryt transformátora	50
Transformátorový olej	1

Program ANSYS umožňuje vykresliť aj rozloženie magnetických siločiar. Magnetické siločiaru umožňujú určiť smer a hustotu silového pôsobenia v jednotlivých bodoch. Ich rozloženie je znázornené na Obr. 2. Z obrázka je možné vidieť, že väčšina siločiar sa uzatvára vo vnútornej časti transformátora. Zvyšné čiary pôsobia v okolí modelu, kde sa vzdialenosťou stráca ich hustota. Ďalší obrázok predstavuje rozloženie magnetickej indukcie B .

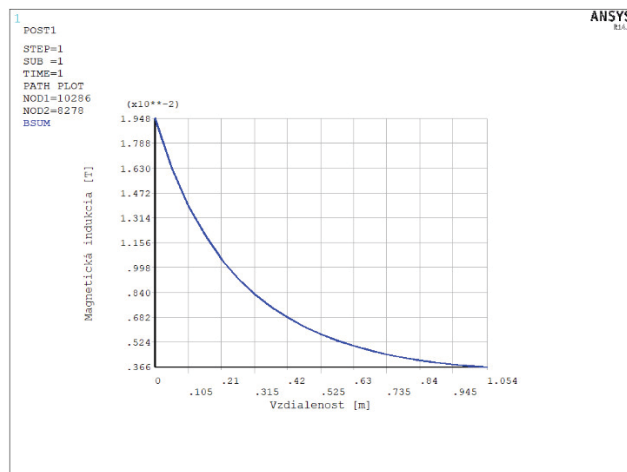


Obr. 2 Magnetické siločiar



Obr. 3 Rozloženie magnetickej indukcie

Rozloženie magnetickej indukcie korešponduje tvaru a hustote siločiar. Najvyššiu dovolenú hodnotu magnetickej indukcie v okolí zdroja elektromagnetického žiarenia ustanovuje Vyhláška MZ SR 534/2007. Z.z. Z tejto vyhlášky vyplýva, že povolená hodnota magnetickej indukcie pri frekvencii zdroja 50 Hz je 100 μ T. Zo simulácie je viditeľné, že táto limitná hodnota je v okolí transformátora niekoľkonásobne prekročená. Najvyššia hodnota indukcie je v okolí transformátorových plechov (a na nádobe) s hodnotou okolo 1 T, táto hodnota rapídne klesá v závislosti od vzdialenosti od modelu transformátora. Táto závislosť je viditeľnejšia na grafe, ktorý bol vytvorený pomocou úsečky. Začiatok úsečky je na pravej strane modelu, tesne za krytom transformátora a pokračuje horizontálne, do vzdialenosti približne jedného metra od modelu.



Obr. 4 Závislosť magnetickej indukcie od vzdialenosti

Z grafickej závislosti na Obr. 4 je vidieť, že najvyššia hodnota magnetickej indukcie je v tesnej blízkosti krytu transformátora s hodnotou 19 480 μ T. V približne metrovej vzdialenosti,

je už táto hodnota asi päťnásobne nižšia. Napriek tomu, že magnetická indukcia klesá so zvyšujúcou sa vzdialenosťou, v okolí modelu do vzdialenosti jedného metra (podľa vyhlášky 534/2007 Z.z.), nie je bezpečné sa približovať pre človeka, keďže najnižšia hodnota v grafe má hodnotu $3\,660\,\mu\text{T}$ a limitná hodnota podľa tejto vyhlášky je $100\,\mu\text{T}$. Na zamestnanca, vyskytujúceho sa na pracovisku v okolí elektromagnetického poľa, sa vzťahuje Nariadenie vlády SR 209/2016, ktorého limitné hodnoty magnetického poľa sú oveľa vyššie, ako vo Vyhláške č. 534/2007. Nariadenie vlády SR č. 209/2016 udáva 3 rôzne limitné hodnoty indukcie, v závislosti od účinkov elektromagnetického poľa na jednotlivé časti organizmu. V tomto prípade, boli výsledky simulácií zamerané na strednú limitnú hodnotu magnetickej indukcie $B_{a,h}$, ktorej veľkosť je od 500 do $6000\,\mu\text{T}$. Pri pôsobení magnetickej indukcie v tomto rozmedzí môže dôjsť k dočasnej zmene v mozgovej činnosti. Zamestnanec by v tomto prípade mohol v okolí transformátora pracovať v blízkosti cca $0,5$ metra. [2], [3]

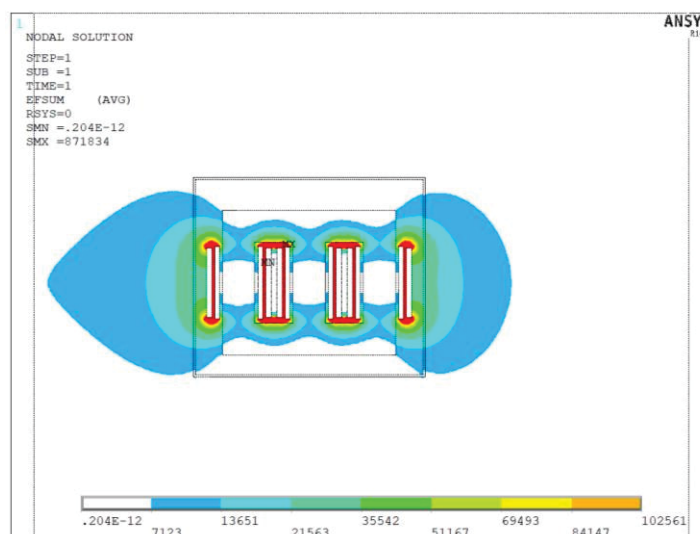
B. Elektrické pole

Pri zisťovaní rozloženia elektromagnetického poľa pomocou programu ANSYS, je potrebné zadať hodnoty relatívnych permitívít jednotlivých materiálov. Tieto hodnoty sú uvedené v Tab. 2. Po vytvorení geometrie a sieťovania boli zadane hodnoty napätí na jednotlivé vinutia. Na primárne vinutia boli nastavené hodnoty $10\,500\,\text{V}$ a na sekundárne vinutia $400\,\text{V}$. Posledným krokom bol výpočet a vyhodnotenie rozloženia elektrického poľa.

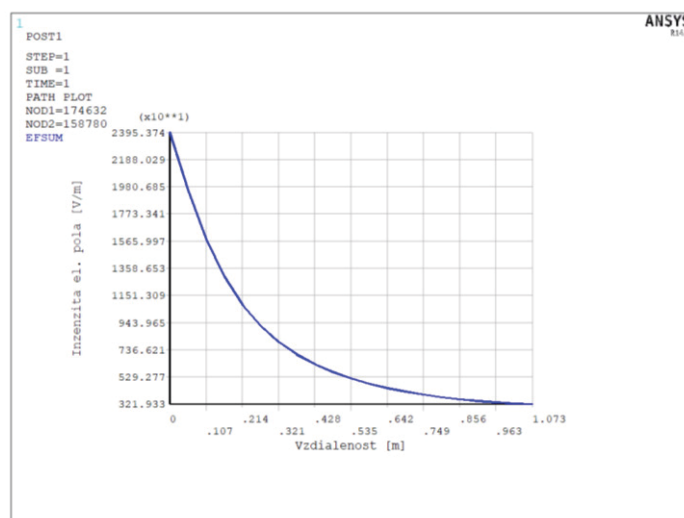
TABUĽKA 2
 Hodnoty relatívnych permitívít jednotlivých materiálov

Materiály	Relatívna permitivita ϵ_r (-)
Vzduch	1,0006
Transformátorový plech	1,9
Hliník	3,5
Kryt transformátora	1,9
Transformátorový olej	2,1

Na Obr. 5 je už viditeľnejšie rozloženie intenzity aj v okolí transformátora. Červená farba sa v legende nenachádza, no napriek tomu označuje maximálnu hodnotu intenzity, ktorej veľkosť je $871\,834\,\text{V/m}$ (tesne nad vinutiami vn). Najvyššiu dovolenú hodnotu magnetickej indukcie, v okolí zdroja elektromagnetického žiarenia, ustanovuje Vyhláška MZ SR č. 534/2007 Z.z. Z tejto vyhlášky vyplýva, že povolená hodnota intenzity elektrického poľa pri frekvencii siete $50\,\text{Hz}$ je $5\,000\,\text{V/m}$. Zo simulácie je viditeľné, že táto limitná hodnota je na modeli transformátora niekoľkonásobne prekročená. Najvyššia intenzita sa nachádza medzi vinutiami a jej hodnota klesá so štvorcom vzdialenosti od zdroja tohto poľa. Z daného rozloženia elektrického poľa bol pomocou úsečky vytvorený graf, keďže limitná hodnota intenzity elektrického poľa v okolí zariadenia je $5\,000\,\text{V/m}$, a z obrázku nebolo možné určiť jej približnú hranicu. Začiatok úsečky je na pravej strane modelu, tesne za krytom transformátora a pokračuje horizontálne do vzdialenosti približne jedného metra od modelu.



Obr. 5 Rozloženie intenzity elektrického poľa



Obr. 6 Závislosť intenzity elektrického poľa od vzdialenosti

Z grafickej závislosti na Obr.6 je vidieť, že najvyššia hodnota intenzity elektrického poľa je v tesnej blízkosti krytu transformátora s hodnotou 23 953,74 V/m. Elektrická intenzita v okolí transformátora prudko klesá, pričom už vo vzdialenosti cca 0,6 m je jej hodnota bezpečná pre človeka, čo vyplýva z Vyhlášky č. 534/2007, ktorá ustanovuje limitnú hodnotu intenzity elektrického poľa na 5 000 V/m. Ako bolo uvedené pre magnetické pole, na zamestnanca vyskytujúceho sa na pracovisku v okolí elektromagnetického poľa sa vzťahuje Nariadenia vlády SR 209/2016, ktorého limitné hodnoty magnetického poľa sú oveľa vyššie, ako vo Vyhláške č. 534/2007. Nariadenie vlády SR 209/2016 uvádza 2 rôzne limitné hodnoty intenzity E , v závislosti od účinkov elektromagnetického poľa na jednotlivé časti organizmu. V tomto prípade boli výsledky zamerané na strednú limitnú hodnotu intenzity elektrického poľa $E_{a,d}$, ktorej veľkosť je do 10 000 V/m. Pri pôsobení intenzity v tomto rozmedzí môže dôjsť k dočasnej zmene v mozgovej činnosti. Zamestnanec by v tomto prípade mohol v okolí transformátora pracovať v blízkosti cca 0,2 metra.

IV. ZÁVER

Cieľom tohto článku bolo prezentovať výsledky rozloženie elektromagnetického poľa v okolí transformátora. V článku sú uvedené výstupy z programu Ansys, pomocou ktorých boli určené hodnoty magnetickej indukcie B a intenzity elektrického poľa E . Výsledné hodnoty indukcie a intenzity boli vysoké a preto zo simulácií obťažné odčítať limitné hodnoty, ktoré boli porovnávané s Vyhláškou MZ SR č. 534/2007 a Nariadením vlády SR č. 209/2016. Na základe toho boli vytvorené grafické závislosti, z ktorých bolo jednoduchšie odčítať požadované hodnoty. Porovnaním limitných a odčítaných hodnôt z grafu s Vyhláškou MZ SR č. 534/2007 vyplýva, že nie je vhodné, aby sa živé organizmy zdržiavali v blízkosti tohto transformátora. Porovnaním limitných a odčítaných hodnôt z grafu s nariadením vlády SR č. 209/2016 vyplýva, že zamestnanci vyskytujúci sa v blízkosti takéhoto zariadenia na pracovisku, sa môžu zdržiavať v jeho blízkosti, ale obmedzený čas alebo v dostatočnej vzdialenosti. Preto, simulovaný transformátor by mal byť umiestnený v trafostanici alebo je uložený v bezpečnej výške cca 4 m nad zemou. Tieto uloženia by mali dostatočne obmedziť vplyv elektromagnetického poľa na obyvateľov.

POĎAKOVANIE

Tento príspevok vznikol vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR a SAV podporenej grantom VEGA 1/0372/18, VEGA 1/0435/19 a tiež v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt *Ochrana obyvateľstva SR pred účinkami elektromagnetických polí* (ITMS kód: 26220220145), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



Agentúra
 Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR
 pre štrukturálne fondy EÚ

LITERATÚRA

- [1] Drahoš, R., „*Elektromagnetické polia v priemysle*“, [online]. [cit. 2019–04–19], Dostupné na internete: <<http://www.džr.sk/texty/elektromagneticke%20polia%20v%20priemysle.pdf>>
- [2] Nariadenie vlády SR č. 209/2016 Z. z. Nariadenie vlády Slovenskej republiky z 01.07.2016 o minimálnych zdravotných a bezpečnostných požiadavkách na ochranu zamestnancov pred rizikami súvisiacimi s expozíciou elektromagnetickému poľu.
- [3] Vyhláška MZ SR č. 534/2007 Zb. Ministerstva zdravotníctva Slovenskej republiky zo 16. augusta 2007 o podrobnostiach o požiadavkách na zdroje elektromagnetického žiarenia a na limity expozície obyvateľov elektromagnetickému žiareniu v životnom prostredí.
- [4] Presada, J., „*Posudzovanie vplyvu elektromagnetického poľa v okolí silových zariadení*“. Bakalárska práca. Technická univerzita v Košiciach, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2019.