

## KOMPUTEROWA ANALIZA ROZKŁADU POLA ELEKTRYCZNEGO WOKÓŁ UZWOJENIA ODPYLACZA BIFILARNEGO

### Streszczenie

Analiza poprawności działania budowanych maszyn i urządzeń odbywa się w każdym czasie procesu ich powstawania, od fazy koncepcji do fazy prototypów. Początkową weryfikacją przyjętych założeń konstrukcyjnych jest analiza matematyczna. Obecnie jest ona wspomagana komputerowo. W analizie tej wykorzystuje się oprogramowania uniwersalne lub specjalizowane. W przypadku oprogramowania uniwersalnego wspomagane są obliczenia matematyczne, natomiast zjawiska fizyczne i warunki brzegowe muszą być zdefiniowane i opisane przez badacza. Natomiast programy specjalizowane są przeznaczone do analiz konkretnych zjawisk fizycznych. W tych programach wykorzystywany jest jeden model fizyczny zjawiska oraz przyjmowane są określone warunki brzegowe. W tym przypadku odpowiednio dobrany algorytm obliczeń znacząco przyspiesza działanie programu. Dodatkowo są one sprzęgane z programami graficznymi. W pracy przedstawiono jeden ze specjalizowanych programów wspomagających analizę rozkładu pola elektrycznego.

**Słowa kluczowe:** pole elektryczne, symulacja komputerowa

### Wykaz oznaczeń

$\varphi$  - potencjał pola elektrycznego, V  
 $\rho$  - gęstość objętościowa ładunków elektrycznych, C/m<sup>3</sup>  
 $\varepsilon$  - przenikalność elektryczna środowiska, F/m  
 $\varepsilon_i$  - względna przenikalność dielektryczna izolacji uzwojeń  
 $\varepsilon_k$  - względna przenikalność dielektryczna karkasu  
 $U$  - napięcie zasilania uzwojeń, V  
 $a$  - odległość przewodów uzwojeń, mm  
 $d_1, d_3$  - średnica zewnętrzna przewodów uzwojeń, mm  
 $d_2, d_4$  - średnica wewnętrzna przewodów uzwojeń, mm

### Wprowadzenie

W najbardziej uciążliwych gałęziach przemysłowych, takich jak hutnictwo, metalurgia czy energetyka, powszechnie stosowane są odpylacze elektrostatyczne, nazywane elektrofiltrami. Natomiast w przemyśle rolno-

spożywcym (młyny, kaszarnie, paszarnie) elektrofiltry nie znalazły zastosowania z powodu występowania w nich zjawiska koronowego. Zjawisko to jest niebezpieczne ze względu na wybuchowy charakter pyłów. Dlatego w tych zakładach stosowane są wyłącznie odpylacze mechaniczne, głównie filtry tkaninowe.

Skuteczność zastosowanych elektrofiltrów w innych gałęziach przemysłu skłania do poszukiwań metod elektrycznych odpylania możliwych do zastosowania w przemyśle rolno-spożywcym. Jedną z takich możliwości jest wykorzystanie niejednorodnego pola elektrycznego wytwarzanego wokół uzwojenia bifilarnego. Uzwojenie to zasilane jest napięciem z zakresu poniżej występowania zjawiska koronowego. Umożliwia to jego zastosowanie do odpylania pyłów organicznych [Ścibisz 1995; Pietrzyk 2003]. Uzwojenie to znajduje również zastosowanie do separacji materiałów organicznych [Taruškin 1987].

### Opis metody analizy

Wartość siły przyciągającej cząstki organiczne do uzwojenia bifilarnego uzależniona jest od niejednorodności wytworzonego pola elektrycznego. Dlatego przy konstruowaniu rozwiązań technicznych ważne jest, aby wcześniej dokonać analizy teoretycznej rozkładu pola w urządzeniu.

Potencjał skalarny pola elektrostatycznego spełnia równanie Poissona [Matusiak 1982]:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1)$$

które we współrzędnych walcowych przybiera postać:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (r \varphi_r) + \frac{\partial \varphi_\theta}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial \varphi_z}{\partial z} \quad (2)$$

Ze względu na rozbudowany opis matematyczny zjawiska, analiza przez rozwiązywanie równań matematycznych jest procesem skomplikowanym i długotrwałym. Pomocne w takim przypadku okazują się programy komputerowe, wspomagające obliczenia. Takim specjalizowanym programem do wyznaczania rozkładu pola elektrycznego jest m.in. Quick Field firmy Tera Analysis Co.

Obliczenia oparte są tu na metodzie elementu skończonego. Rozwiązanie dokonywane jest w obszarze dwuwymiarowym (2-D). Program umożliwia podzielenie analizowanego obszaru na elementy trójkątne oraz daje możliwość określenia warunków brzegowych. Dodatkowo można

zdefiniować potencjał lub ładunek elektryczny dla dowolnego punktu analizowanego modelu. Ponadto w programie opisywane jest środowisko, w którym dokonywana jest analiza. Wyniki obliczeń są prezentowane w postaci graficznej, przedstawiającej rozkład potencjału skalarnego lub rozkład natężenia pola w analizowanym modelu. Dodatkowo podczas prezentacji rozkładu natężenia pola elektrycznego mogą być zaznaczone linie ekwipotencjalne o wartości dowolnie definiowanej. Istnieje również możliwość określenia dokładnej wartości (w postaci zapisu liczbowego) potencjału, natężenia pola, ładunku powierzchniowego, gęstości energii i przenikalności dielektrycznej w dowolnym punkcie analizowanego modelu, a także przedstawienie wykresu liniowego zmian tych wartości dla dowolnie narysowanego konturu zawartego w obrębie modelu.

Program pozwala także na wykreślenie wektora natężenia pola elektrycznego dla dowolnie wybranego elementu trójkątnego podziału obszaru analizowanego modelu.

W prezentowanej dalej analizie przedstawiono parametry zbudowanego modelu uzwojenia bifilarnego oraz rozkład potencjału skalarnego i rozkład natężenia pola elektrostatycznego.

### **Założenia**

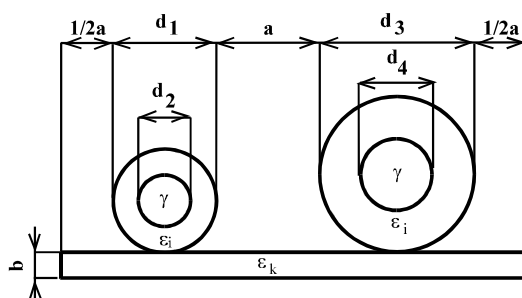
Pełna analiza pola elektrycznego oraz jego wpływu na cząstkę dielektryka powinna uwzględniać: trójwymiarowy charakter pola, nieliniowość środowiska, niejednorodność pyłu, złożony kształt cząstki pyłu oraz dynamikę zjawiska.

Analiza uwzględniająca wszystkie czynniki jest zadaniem bardzo skomplikowanym. Dlatego przyjęto założenia idealizujące upraszczające analizę i jednocześnie nieznieskształcające fizycznej strony zjawiska. Założono, że:

- pole elektryczne jest płaskie (analiza dwuwymiarowa);
- izolacja uzwojeń i karkas są materiałami dielektrycznie jednorodnymi;
- powierzchnie izolacji przewodów są „gładkie” (pominięto ich chropowatość) i stanowią współosiowy układ walcowy.

W celu przeprowadzenia analizy wpływu parametrów uzwojenia bifilarnego na rozkład pola elektrycznego poddano analizie wycinek uzwojenia wykonanego przewodem o kołowym polu przekroju. Model układu przedstawiono na rysunku 1. We wszystkich przypadkach przewody uzwojenia stykały się ze sobą ( $a = 0$ ), przenikalność izolacji (polwinit) wynosiła  $\epsilon_i = 4,25$ , a przenikalność dielektryczna karkasu (polichlorek

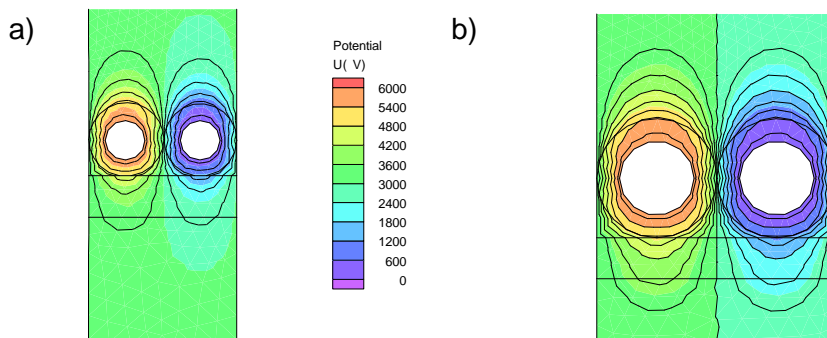
winyłu, winidur) wynosiła  $\epsilon_k = 3,6$ . Uzwojenia były zasilane napięciem  $U = 6\ 000\text{ V}$ .



Rys.1. Model układu uzwojeń bifilarnych wykorzystany do analizy pola  
Fig. 1. Model of bifilar windings used to electric field analysis

### Analiza rozkładu pola elektrycznego

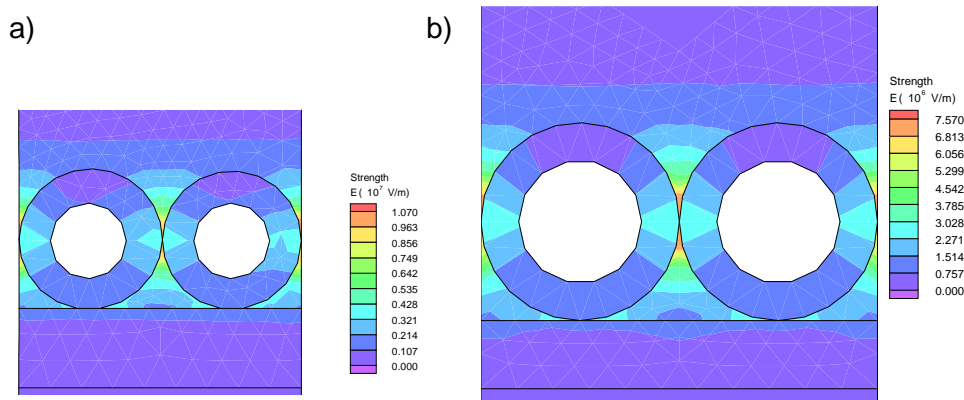
W symulacji analizowano rozkład potencjału pola elektrycznego wokół uzwojenia oraz rozkład natężenia pola elektrycznego wokół uzwojenia. Graficzne wyniki omawianej analizy przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys.2. Rozkład potencjału wokół uzwojenia bifilarnego wykonanego przewodami o wymiarach: a)  $d_1 = d_3 = 3,4\text{ mm}$ ;  $d_2 = d_4 = 1,8\text{ mm}$ ; b)  $d_1 = d_3 = 5,8\text{ mm}$ ;  $d_2 = d_4 = 3,6\text{ mm}$

Fig. 2. Potential distribution around bifilar winding made of electric wires of following dimensions: (a)  $d_1 = d_3 = 3,4\text{ mm}$ ,  $d_2 = d_4 = 1,8\text{ mm}$ , (b)  $d_1 = d_3 = 5,8\text{ mm}$ ,  $d_2 = d_4 = 3,6\text{ mm}$

Analiza graficzna rozkładu potencjału pozwala wyznaczyć punkty układu w których występuje szczególne zagrożenie związane z przebiciem elektrycznym.



Rys.3. Rozkład natężenia pola elektrycznego wokół uzwojenia bifilarnego wykonanego przewodami o wymiarach: a)  $d_1 = d_3 = 3,4$  mm,  $d_2 = d_4 = 1,8$  mm, b)  $d_1 = d_3 = 5,8$  mm,  $d_2 = d_4 = 3,6$  mm

Fig. 3. Distribution of electric field intensity around bifilar winding made of electric wires of following dimensions: (a)  $d_1 = d_3 = 3,4$  mm,  $d_2 = d_4 = 1,8$  mm, (b)  $d_1 = d_3 = 5,8$  mm,  $d_2 = d_4 = 3,6$  mm

Analiza rozkładu natężenia pola daje możliwość określenia obszarów największej niejednorodności pola elektrycznego, w którym mogą być wychwytywane cząstki organiczne.

### Podsumowanie

Przedstawione oprogramowanie wspomagające jest prostym narzędziem ułatwiającym analizę rozkładu pola elektrycznego. Wymaga ono jedynie wprowadzenia modelu analizowanego obiektu i warunków brzegowych, które wynikają z konstrukcji badanego urządzenia. Nie wymaga ono praktycznej umiejętności korzystania z aparatu matematycznego. Otrzymane wyniki rozkładu pola pokrywają się z rozkładami pól podobnych obiektów, które były analizowane teoretycznie [Gramz 1974].

Tego typu oprogramowanie pozwala już na wstępnym etapie budowy modelu urządzenia sprawdzić i skorygować przyjmowane założenia, bez konieczności wykonywania rzeczywistego modelu. Ogranicza to koszty projektowe, a tym samym rekompensuje zakup oprogramowania, które może być wykorzystywane w innych opracowaniach.

Z analizy wynika, że największy potencjał osiągany jest na powierzchni przewodów uzwojenia, zaś największa różnica potencjałów w obrębie styku przewodów uzwojenia. Stąd styk uzwojeń jest newralgicznym punktem

układu, w którym może nastąpić przebicie elektryczne. Analiza rozkładu natężenia pola elektrycznego wykazała, że największy gradient pola elektrycznego występuje w przestrzeni wokół powierzchni styku obu przewodów. Wyższa wartość natężenia pola elektrycznego powstaje w przypadku uzwojeń wykonanych drutem o mniejszej średnicy.

### **Bibliografia**

Gramz M. i in. 1974. *Field of bifilar lead. Applied Physics*, 5, 173

Matusiak R. 1982. *Elektrotechnika teoretyczna, t.2. WNT, Warszawa*

Pietrzyk W. i in. 2003. *Uzwojenia bifilarne do odpylania w przemyśle rolno-spożywczym. Acta Agrophysica*, 43

Ścibisz M. 1995. *High voltage application to dust filtrate. Ninth International Symposium on High Voltage Engineering. Graz, Austria, Proceedings*, p.7892 1-3.

Taruškin V.I. 1987. *Soviersenstvovanie processa separirovanija semen. Mechanizacija i Elektrifikacija Siel'skovo Chozijaistva*, 36-41, 3

## **COMPUTER ANALYSIS OF THE ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION AROUND THE WINDING OF BIFILAR DUST ELECTRO-FILTER**

### **Summary**

Correct functioning of constructed machines and devices is being analyzed during their arising from the concept up to the prototype stage. Mathematical, actually computer aided, analysis is applied to initial verification of assumed constructional foredesign. Either an universal or specialistic software is used to such analysis. In case of universal software the mathematical calculations are computer aided, whereas the physical phenomena and boundary conditions have to be defined and described by investigator – designer. In specialistic programmes, however, provided to analysis of particular physical phenomena, one physical model of given phenomenon is used at assumption of determined boundary conditions. In such a case good matched computation algorithm accelerates the programme operation. Moreover, they are also connected with the graphical programmes. Paper presented one of the specialistic programmes aiding the analysis of electric field distribution.

**Key words:** dust filters, electric field distribution, computer simulation

*Recenzent – Wiktor Pietrzyk*