

Krzysztof KRASUSKI

PORÓWNANIE MODELI NUMERYCZNYCH I FIZYCZNYCH STYKÓW KOMÓR PRÓŻNIOWYCH

STRESZCZENIE *Artykuł zawiera wyniki obliczeń i pomiarów rozkładu pola magnetycznego na powierzchni nakładki styków komór wyłączników próżniowych. Obliczenia pola magnetycznego przeprowadzono za pomocą programu Maxwell 3D. Pomiary rozkładu pola wykonano za pomocą układu trzech sond mierzących pole magnetyczne (promieniowe, obwodowe, osiowe) na powierzchni styku i przeliczono dla prądu 50 kA.*

Słowa kluczowe: *komora próżniowa, styk unipolarny, pole elektromagnetyczne*

1. WSTĘP

W latach sześćdziesiątych opublikowano pierwsze wyniki badań komór wyłączników próżniowych wyposażonymi w styki generujące osiowe pole magnetyczne AMF (Axial Magnetic Field) [3]. Stwierdzono, że zastosowanie styków z polem AMF spowodowało zwiększenie zdolności łączeniowej komory próżniowej od 50% do 100%. W kolejnych latach opisano zjawiska zachodzące na powierzchni nakładek stykowych podczas pracy komory próżniowej [1, 4, 6, 7].

inż. Krzysztof KRASUSKI
e-mail: k.krasuski@iel.waw.pl

Zakład Wielkich Mocy,
Instytut Elektrotechniki

Prace prowadzone w wielu ośrodkach naukowych na świecie pozwoliły stwierdzić, że zapewnienie równomiernego rozkładu składowej osiowej indukcji magnetycznej pomiędzy stykami pozwala uzyskać możliwie jednorodną gęstość łuku dyfuzyjnego na powierzchni styków i tym samym zmniejszyć miejscowe ich zużycie [8, 9].

Rozkład pola magnetycznego determinowany jest poprzez rodzaj konstrukcji, ustawienie styków względem siebie oraz kształt nacięć na nakładkach stykowych.

W Instytucie Elektrotechniki prowadzone są obliczenia rozkładu pola na powierzchni styków przy użyciu programu Maxwell 3D. Wykonywane są pomiary składowych pola magnetycznego za pomocą układu sond (cewek) mierzących pole w trzech kierunkach (osiowe, obwodowe, promieniowe) [7]. W publikacji przedstawiono wyniki obliczeń oraz pomiarów rozkładu pola na powierzchni nakładki styku unipolarnego dla przepływu sinusoidalnego prądu 50 kA. Prowadzone prace badawcze mają na celu porównanie rozkładu pola na powierzchni nakładek stykowych w różnych konstrukcjach i ustawieniach styków względem siebie. Stosowane metody pomiaru mają pomóc w znalezieniu optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych styków.

2. MODEL MATEMATYCZNY ZAGADNIENIA ORAZ ZASTOSOWANE OPROGRAMOWANIE

Obliczenia quasistacjonarnego pola magnetycznego między stykami rozważanego wyłącznika wykonano z wykorzystaniem komercyjnego pakietu oprogramowania Maxwell v.11.1 amerykańskiej firmy Ansoft. Jak wynika z dokumentacji technicznej producenta w powyższym pakiecie do rozwiązywania trójwymiarowych zagadnień wiroprowodowych zastosowano model $T-\Omega$, gdzie T oznacza wektorowy potencjał elektryczny, natomiast Ω jest skalarnym potencjałem magnetycznym. Potencjał T zdefiniowany jest następująco:

$$\text{rot } T = J \quad (1)$$

Ponadto, w podobszarach wiroprowodowych spełniona jest zależność:

$$H = H_0 + T - \text{grad } \Omega \quad (2)$$

gdzie H_0 jest natężeniem pierwotnego pola magnetycznego, które wzbudzone jest przez z góry założone prądy wzbudzenia. W podobszarach bezprądowych

bądź w podobozzarach z prądami wzbudzenia (gdzie nie uwzględnia się prądów wirowych) zachodzi:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 - \text{grad } \Omega \quad (3)$$

Wykorzystując równania Maxwella oraz podane wyżej zależności można sformułować równania różniczkowe cząstkowe drugiego rzędu stanowiące podstawę modelu $T-\Omega$. W niniejszej pracy ze względu na charakter analizowanych zagadnień ograniczono się do obszarów strefowo niejednorodnych, składających się z podobozzarów jednorodnych liniowych i izotropowych. I tak w podobozzarze wiroprądowym mamy:

$$\text{rot rot } \mathbf{T} + j\omega\gamma\mu \mathbf{T} = -j\omega\gamma\mu (\mathbf{H}_0 - \text{grad } \Omega) \quad (4)$$

gdzie:

- j – jednostka urojona,
- ω – pulsacja,
- γ – konduktywność,
- μ – przenikalność magnetyczna.

W podobozzarach nieprzewodzących skalarny potencjał wtórnego pola magnetycznego spełnia równanie Laplace'a:

$$\Delta\Omega = 0 \quad (5)$$

Zastosowanie modelu $T-\Omega$ pozwala niekiedy na zredukowanie liczby niewiadomych występujących w zagadnieniu brzegowym. Ma to miejsce np. w przypadku analizy pola w obiekcie blachowanym umieszczonym w poprzecznym polu magnetycznym. W tym przypadku występują jedynie dwie składowe gęstości prądu (w płaszczyźnie blachy), co powoduje, że wektorowy potencjał elektryczny ma tylko jedną składową (w kierunku prostopadłym do blach). Tego typu problemy są charakterystyczne dla analizy pola elektromagnetycznego w strefach skrajnych maszynach elektrycznych. Jednak zagadnienia analizowane w niniejszej pracy są w pełni trójwymiarowe i nie ma tutaj możliwość redukcji liczby niewiadomych. Warunki zgodności pola na granicy pomiędzy obszarem wiroprądowym a powietrzem są następujące:

$$\mathbf{n} \cdot \mu_0 (\mathbf{H}_0 - \text{grad}\Omega) \Big|_{air} = \mathbf{n} \cdot \mu\mathbf{H} \Big|_{eddy} \quad (6)$$

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{H}_0 - \text{grad}\Omega)|_{air} = \mathbf{n} \times \mathbf{H}|_{eddy} \quad (7)$$

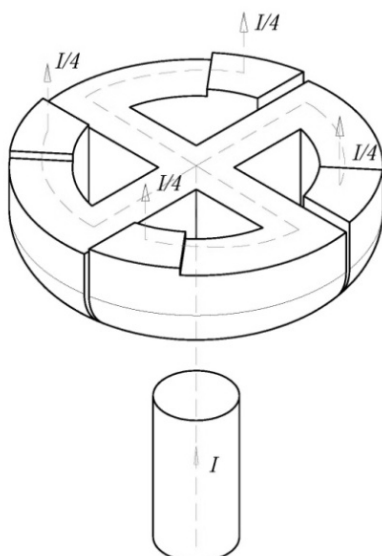
Ponadto, na powierzchni łączącej doprowadzenia prądu do obszaru wirowego obowiązuje warunek ciągłości składowej normalnej gęstości prądu:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}|_{eddy} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}|_{exci} \quad (8)$$

Opisane wyżej zagadnienia brzegowe rozwiązywane są metodą elementów skończonych (MES) przy użyciu programu Maxwell.

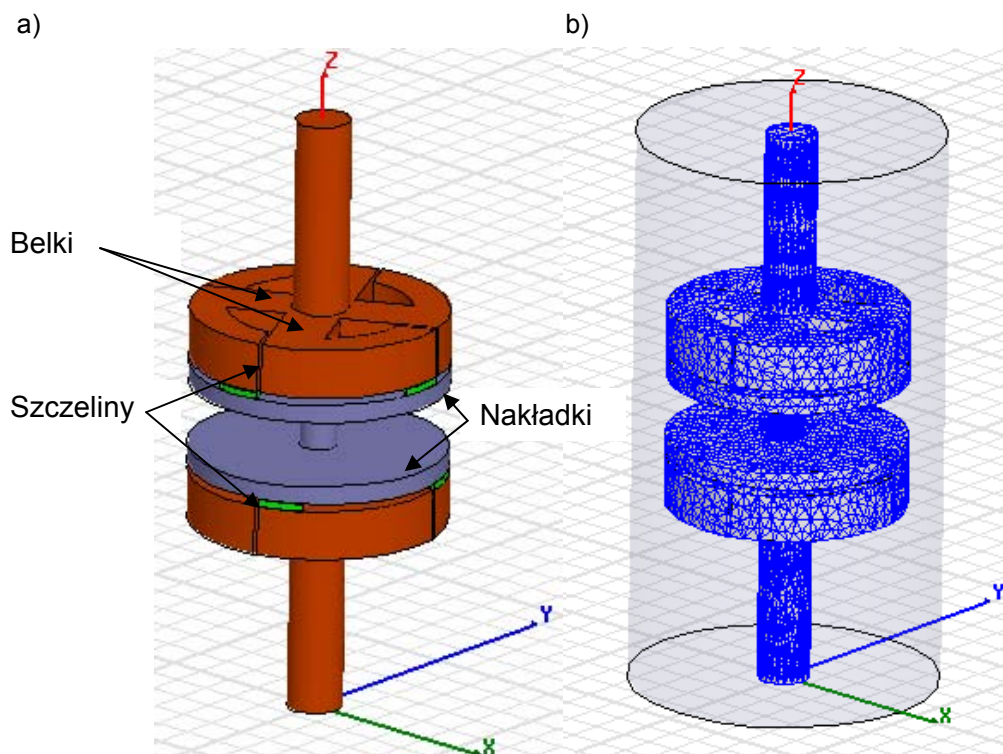
3. WYNIKI OBLICZEŃ MODELU NUMERYCZNEGO STYKU UNIPOLARNEGO

Za pomocą programu Maxwell w oparciu o styk przedstawiony na rysunku 1 zaimplementowano model numeryczny unipolarnego układu stykowego o średnicy $\varnothing 70$ mm. Wymiary styku zapisanego w programie Maxwell 3D są zgodne z wymiarami modelu fizycznego wykorzystywanego w badaniach. Styki ustawiono równoległe szczelinami (rys. 2a) i połączono kołkiem o średnicy $\varnothing 10$ mm, wysokości 18 mm analogicznie jak w modelu wykorzystywanym w pomiarach (rys. 6). Obwód prądowy zbudowano poprzez ulokowanie styków w walcu wypełnionym powietrzem (rys. 2b). Na dolnej powierzchni walca zdefiniowano źródło prądu 50 kA o częstotliwości 50 Hz. Zamodelowany układ zapewnia równomierny rozpływ prądu w stykach.

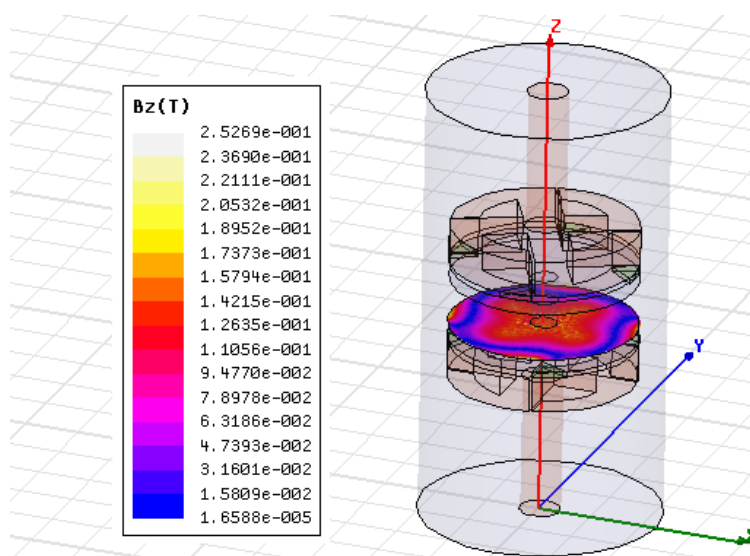


Rys. 1. Rozpływ prądu w cewce układu unipolarnego

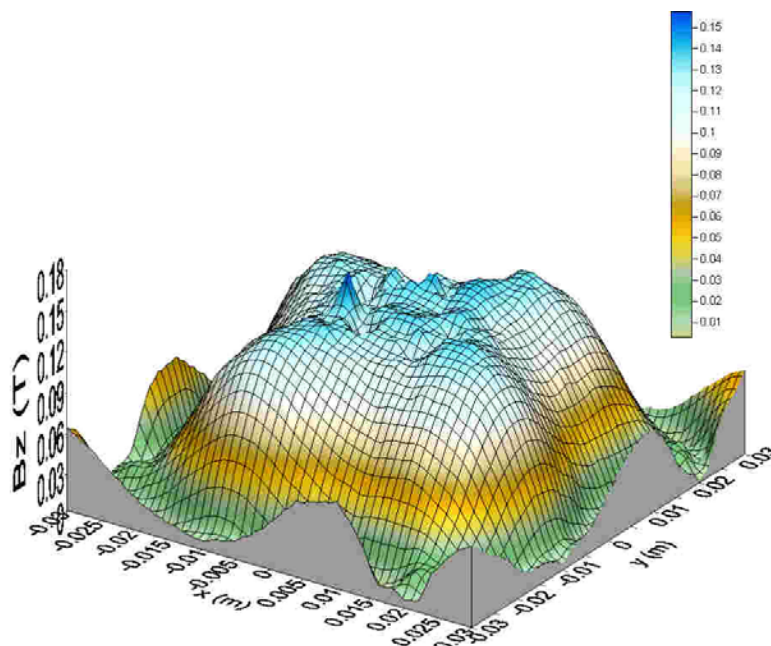
Rozważany w pracy model styków wyłącznika został dyskretyzowany siatką 181030 elementów skończonych o kształcie czworościanów, tak jak to pokazano na rysunku 2b. Całkowity czas rozwiązywania zagadnienia na komputerze z procesorem Intel Core 2 Duo T7600 2,33 GHz wyniósł 31 min.



Rys. 2. Układ stykowy unipolarny:
a) ustawienie styków, b) dyskretyzacja modelu



Rys. 3. Rozkład składowej osiowej indukcji magnetycznej na powierzchni nakładki (obliczenia)



Rys. 4. Trójwymiarowy rozkład składowej osiowej indukcji magnetycznego nad powierzchnią nakładki (obliczenia)

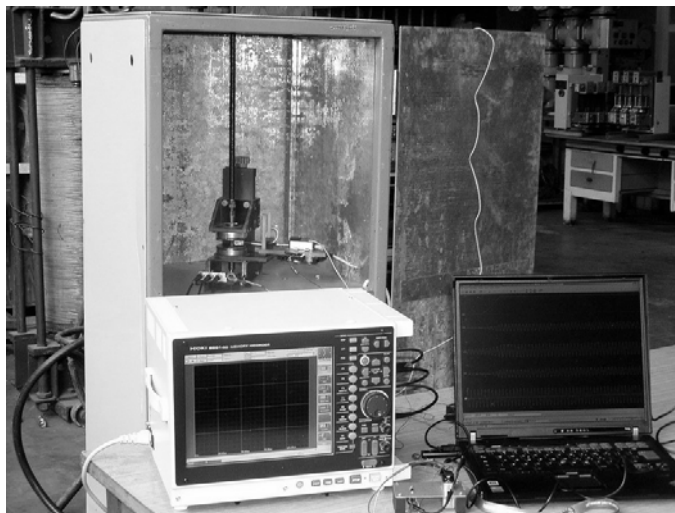
Z przedstawionego rysunku (rys. 3) wynika, że największa wartość składowej osiowej indukcji (AMF) jest skoncentrowana w pobliżu kołka oraz pomiędzy belkami gdzie wynosi około 200 mT. Rozkład pola magnetycznego jest ściśle związany z konstrukcją styku. Wyniki obliczeń nałożonego na szkic styków zaprezentowano na rysunku 3, 4.

4. STANOWISKO POMIARU ROZKŁADU POLA MAGNETYCZNEGO NA POWIERZCHNI STYKU

W Zakładzie Wielkich Mocy Instytutu Elektrotechniki opracowano stanowisko pomiaru pola magnetycznego na powierzchni nakładek stykowych (rys. 5). Stanowisko składa się z drewnianego stelaża stanowiącego model komory, w którym mocowane są styki połączone ze sobą kołkiem o wysokości 18 mm i średnicy $\varnothing 10$ mm. Pomiędzy stykami umieszczono sondy (cewki) służące do pomiaru składowych pola magnetycznego (promieniowej, obwodowej, osiowej). Cewki zamontowano na potencjometrze, który umożliwia określenie ich położenia względem promienia styku w danym punkcie pomiaru. Konstrukcja pozwala na obrót układu cewek wraz z potencjometrem co 15° w zakresie 180° dookoła osi pionowej styku. W celu wyeliminowania wpływu czynników zewnętrznych (zakłóceń) od przewodów doprowadzających prąd do badanych styków, prze-

wody zasilające wykonano z prętów miedzianych o długości 1 m ustawionych w osi styków. Układ pomiarowy umieszczono w metalowej szafie stanowiącej ekran (klatkę Faradaya).

Rys. 5. Stanowisko pomiaru rozkładu pola magnetycznego na powierzchni styku



W trakcie badań do styków doprowadzono prąd 400 A, o częstotliwości 50 Hz wytwarzający składową osiową indukcji magnetycznej na ich powierzchni. W sondach pomiarowych poruszających się między nakładkami stykowymi indukowane jest napięcie, które jest przesyłane do rejestratora cyfrowego. Zapisane wyniki pomiarów są eksportowane do postaci tekstowej i wczytywane do programu Matlab, który na ich podstawie tworzy graficzny obraz rozkładu pola magnetycznego. Korzystając z równania (9) rejestracja napięcia u pozwala wyznaczyć indukcję B

$$U = -\frac{d\psi(t)}{dt} \quad (9)$$

gdzie

$$\psi(t) = z * B(t) * s \quad (10)$$

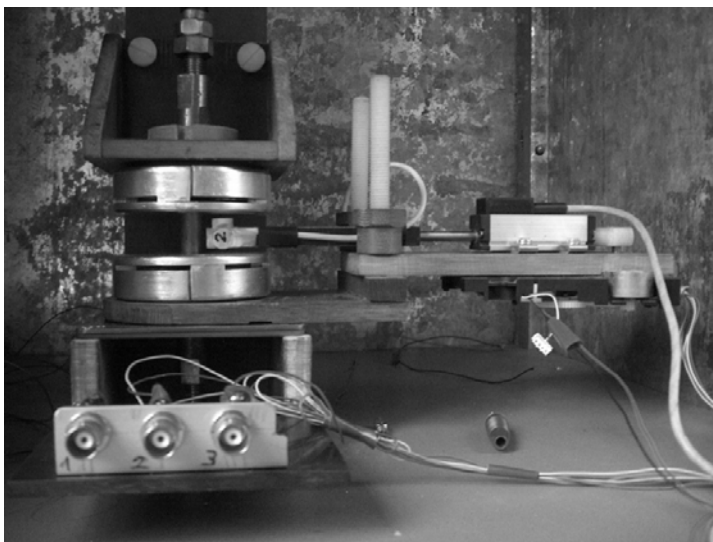
przy czym

- U – rejestrowane napięcie na cewce pomiarowej
- z – liczba zwojów cewki pomiarowej;
- $B(t)$ – chwilowa wartość indukcji magnetycznej (wartość średnia);
- s – powierzchnia obejmowana przez cewkę.

Stanowisko umożliwia badanie stryków o średnicy do 100 mm z wysokością kołka łączącego nakładki o wysokości do 60 mm.

5. WYNIKI POMIARU POLA MAGNETYCZNEGO NA POWIERZCHNI STYKU ZA POMOCĄ UKŁADU SOND

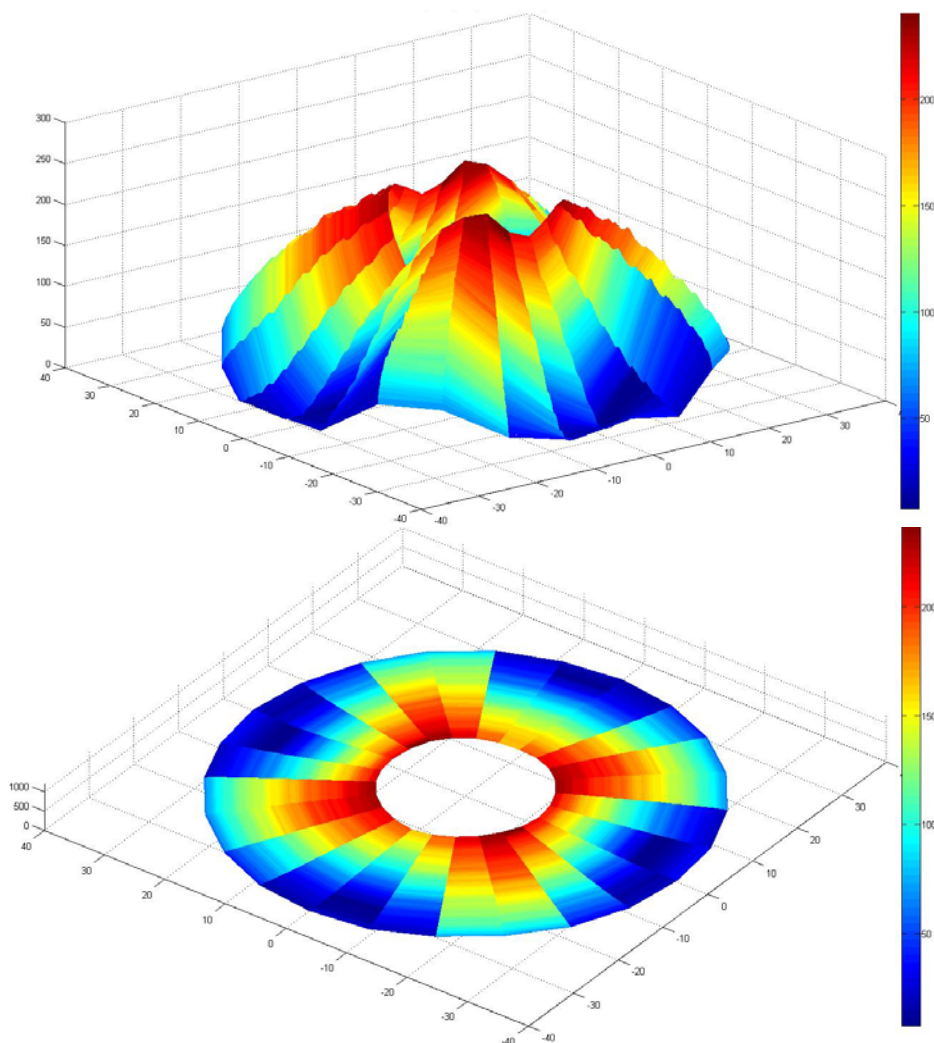
W ramach prac badawczych przeprowadzono pomiary rozkładu składowych (osiowej, obwodowej, promieniowej) indukcji magnetycznej na powierzchni nakładki styku unipolarnego w ustawieniu przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Widok układu pomiarowego z zamontowanymi stykami unipolarnymi

Z analizy pomiarów wynika, że składowa osiowa indukcji magnetycznej przyjmuje wartości od 4 mT do 250 mT (rys. 7). Maksymalne wartości AMF zarówno w analizie matematycznej (Maxwell 3D) jak i w pomiarach są zlokalizowane w tych samych strefach nakładki stykowej. Różnice w przedstawionych wynikach prac mogą być następstwem braku możliwości pomiaru rozkładu pola w centralnej części styku zajętej przez kołek o średnicy $\varnothing 10$ mm. Model matematyczny jest w pewnym zakresie uproszczeniem modelu fizycznego dlatego też pominięto zaokrąglenia krawędzi, chropowatość powierzchni, tolerancje wymiarów. Pomiar napięcia w dolnej części zakresu rejestratora cyfrowego także ma wpływ na uzyskane wyniki badań.

Z uwagi na złożoność obliczeń jak i trudności związane z pomiarami pola magnetycznego rozrzut wyników jest akceptowalny. Dalsze analizy dla innych konstrukcji styków pozwolą na weryfikacje prezentowanej metodyki badań.



Rys. 7. Rozkład składowej osiowej na powierzchni nakładki

6. UWAGI KOŃCOWE

Zakład Wielkich Mocy Instytutu Elektrotechniki zajmuje się opracowaniem nowej konstrukcji komory próżniowej ze stykami generującymi osiową składową indukcji magnetycznej. W komorach próżniowych średniego napięcia powszechnie stosowany jest unipolarny układ stykowy. Kształt styków decyduje o równomiernym rozkładzie stóp łuku po powierzchni styku.

W następnym etapie prac planowane jest przeprowadzenie badań zdolności łączenia prądu zwarcowego w rozbiornym komorze próżniowej w celu zarejestrowania przebiegu gaszenia łuku w funkcji czasu przepływu prądu.

Ponieważ badania zdolności łączeniowej wymagają znacznych środków finansowych i mogą powodować zniszczenie układu stykowego liczbę prób należy ograniczyć. Stąd niezbędne jest przeprowadzenie obliczeń oraz pomiarów

wymagających mniejszych nakładów pieniężnych równocześnie umożliwiającą optymalizację konstrukcji styków. Weryfikacja prezentowanych metod umożliwi rozwój projektowania nowych modeli styków jednocześnie ograniczy ilość poniesionych nakładów oraz przyspieszy proces projektowania nowych komór próżniowych.

LITERATURA

1. Gundlach H.C.W.: "Interaction on between a vacuum arc and an axial magnetic field", ISDEIV, p. A2, 1978.
2. Hartmann W., Lawall A., Renz, R., Wenzel N., Wietzorek W.: "Experimental Investigations on Cathode Spots and Dynamical Vacuum Arc Structure in an Axial Magnetic Field", XXIII-rd Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum – Bucharest – 2008.
3. Ito T., Okura T.: "High current interruption phenomena in vacuum interrupters", Mitsubishi Denki Giro, 41, 1967.
4. Kimblin C. W., Voshall R.: "Interrupting ability of vacuum interrupters subjected to axial magnetic field", IEEE Proc. Vol.119, No 12, 1972.
5. Krasuski K, Dzierżyński A, Sibilski H: „Rozkład pola magnetycznego pomiędzy stykami w komorach próżniowych wyłączników”, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej nr 24 2008, strony 83-88, Politechnika Gdańska 2008
6. Morimiya O. et al: "High current vacuum arcs stabilized by axial magnetic fields", IEEE PES Winter meeting, New York, 1973.
7. Rondeel W. G. J., Foosnas J.: "The energy balance of a vacuum arc in an axial magnetic field", ISDEIV, p. 312, 1976.
8. Schulman M. B., Slade P. G.: "Research and Development of the Vacuum Interrupter and Vacuum Circuit Breaker", 1929 – 1997, Cutler-Hammer Report VI-TM-97-07, Horseheads, NY 1997.
9. Slade P.G.: "The Vacuum Interrupter, Theory, Design and Application", CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008, ISBN 078-0-8493-9091-3.

Rękopis dostarczono dnia 17.08.2010 r.

Opiniował: prof. dr hab. inż. Zygmunt Piątek

COMPARISON OF NUMERICAL AND PHYSICAL MODELS OF CONTACTS OF VACUUM CIRCUIT BREAKER

Krzysztof KRASUSKI

ABSTRACT *The paper presents results of measurements and calculations of the magnetic field distribution on models of coil contacts of HV interrupter vacuum chambers. Calculation was made using Maxwell 3D computer software. The magnetic field was measured using a system of 3 coils (axial, azimuthal, radial); the results were recalculated for 50 kA.*