

Dariusz KUSIAK*
Zygmunt PIĄTEK*
Tomasz SZCZEGIELNIAK*
Paweł JABŁOŃSKI*

WYZNACZANIE POLA MAGNETYCZNEGO W NIEEKRANOWANYM TRÓJFAZOWYM CZTEROPRZEWODOWYM TORZE WIELKOPRĄDOWYM O SZYNACH PROSTOKĄTNYCH

W pracy przedstawiono wyniki obliczeń pola magnetycznego w nieekranowanym trójfazowym szynoprzewodzie wyprodukowanym przez Holduct Mysłowice. Z omówionych wzorów można otrzymać analityczny opis pola magnetycznego. Obliczenia teoretyczne wyznaczono również za pomocą elementów skończonych. Pomiarów wykonano z użyciem specyficznego bezkierunkowego miernika pola magnetycznego. Uzyskano zadawalającą zgodność obliczeń, ale w niektórych punktach pomiarowych różnice są znaczne, prawdopodobnie ze względu na nieprawidłowe pozycjonowanie sondy pomiędzy szynami.

SŁOWA KLUCZOWE: pole magnetyczne, szynoprzewód prostokątny, tor wielkoprądowy

1. WPROWADZENIE

Połączenia elektryczne pomiędzy głównymi urządzeniami i aparatami stacji elektroenergetycznych, przewodzące prąd o znacznych wartościach, wykonuje się przeważnie za pomocą mocowanych na izolatorach wsporczych gołych przewodów aluminiowych lub miedzianych nazywanych przewodami szynowymi lub szynami.

Wartości natężeń zmiennych pól magnetycznych emitowanych przez takie szynoprzewody są duże nawet w warunkach znamionowych [1, 2]. Znajomość tego pola, o częstotliwości przemysłowej, w różnego typu pracujących systemach jest wymagana ze względu na oddziaływanie na własne elementy, środowisko naturalne, bezpieczeństwo personelu i ludzi. W każdym przypadku szynoprzewodu należy zatem sprawdzić pole magnetyczne w ich otoczeniu – czy nie przekracza ono wartości dopuszczalnych określonych przez odpowiednią normę.

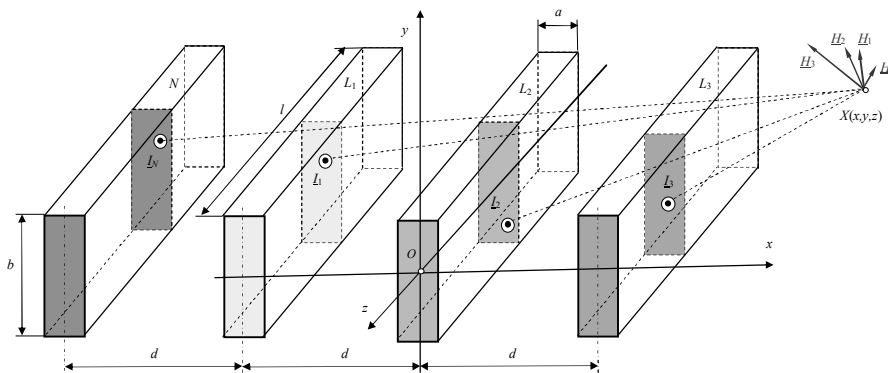
* Politechnika Częstochowska.

Znaczenie miedzianych szynoprzewodów prostokątnych stosowanych w rozdzielniach SN i WN będzie wzrastać. Ale szczególnie duży wzrost tego znaczenia dotyczyć będzie szynoprzewodów prostokątnych nn (do 1 kV) jako podstawowego układu zasilania urządzeń elektrycznych w zakładach przemysłowych. Współczesna produkcja jest bowiem produkcją o krótkich seriach, co pociąga za sobą konieczność częstych zmian ustawienia maszyn, a tym samym konieczność częstych zmian zasilania. Jest to dużym i kosztownym problemem w przypadku zasilania liniami kablowymi. Problem ten w praktyce znika, gdy zasilanie maszyn jest prowadzone z ciągu szynoprzewodu z możliwością przyłączenia skrzynek odpływowych.

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń i pomiarów pola magnetycznego nieekranowanego trójfazowego czteroprzewodowego szynoprzewodu wyprodukowanego przez firmę Holduct Mysłowice.

2. POLE MAGNETYCZNE

Rozpatrzono czteroprzewodowy tor wieloprądowy o szynoprzewodach prostokątnych o wymiarach $a \times b \times l$ i odległości d między nimi (rys. 1) z asymetrią prądową: $\underline{I}_1 = \underline{I} e^{j0^\circ}$, $\underline{I}_2 = 0.5 \underline{I} e^{-j120^\circ}$, $\underline{I}_3 = \underline{I} e^{j120^\circ}$ i prądem w szynie neutralnej $\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0.5 \underline{I} e^{j60^\circ}$.



Rys. 1. Czteroprzewodowa linia trójfazowa o szynoprzewodach prostokątnych

Wtedy całkowite pole elementarne w punkcie $X(x, y, z)$ generowane przez prądy w obszarach elementarnych przewodów fazowych i przewodu neutralnego dana jest wzorem

$$d\mathbf{H} = d\mathbf{H}_1 + d\mathbf{H}_2 + d\mathbf{H}_3 + d\mathbf{H}_N \quad (1)$$

zaś pole magnetyczne całkowite w tym punkcie wyraża się wzorem

$$\begin{aligned} \underline{H} &= (\underline{H}_{x1} + \underline{H}_{x2} + \underline{H}_{x3} + \underline{H}_{xN}) \mathbf{1}_x + (\underline{H}_{y1} + \underline{H}_{y2} + \underline{H}_{y3} + \underline{H}_{yN}) \mathbf{1}_y = \\ &= \underline{H}_x \mathbf{1}_x + \underline{H}_y \mathbf{1}_y \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie

$$\begin{aligned} \underline{H}_x(x, y) &= \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} d\underline{H}_x \, dx' dy' = \\ &= -\frac{I}{4\pi a b} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{y - y'}{(x - x')^2 + (y - y')^2} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) dx' dy' \end{aligned} \quad (3)$$

oraz

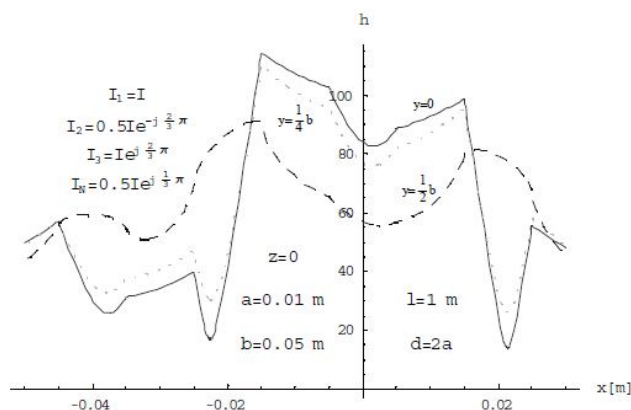
$$\begin{aligned} \underline{H}_y(x, y) &= \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} d\underline{H}_y \, dx' dy' = \\ &= \frac{I}{4\pi a b} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{x - x'}{(x - x')^2 + (y - y')^2} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) dx' dy' \end{aligned} \quad (4)$$

zaś moduł pola magnetycznego wypadkowego

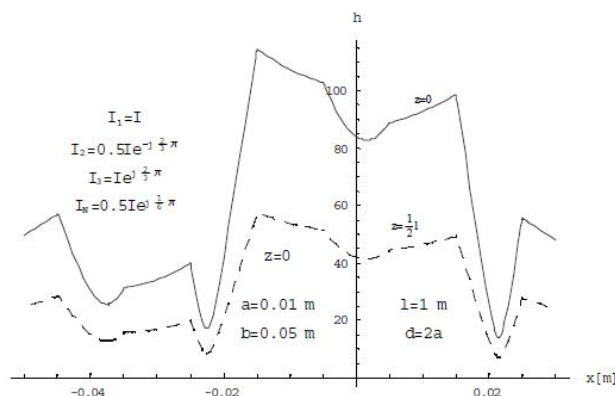
$$\begin{aligned} \underline{H}(x, y) &= \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} d\underline{H} \, dx' dy' = \\ &= \frac{I}{4\pi a b} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \frac{1}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) dx' dy' \end{aligned} \quad (5)$$

Składowe \underline{H}_{x1} i \underline{H}_{y1} , \underline{H}_{x2} i \underline{H}_{y2} oraz \underline{H}_{x3} i \underline{H}_{y3} wyrażają się odpowiednio wzorami zastosowanymi dla trójfazowego układu trójprzewodowego [3]. Składowe \underline{H}_{xN} i \underline{H}_{yN} wyrażają się odpowiednio wzorami (3) i (4) po podstawieniu w nich $x + 2d$ za zmienną x oraz przyjmując prąd $\underline{I}_N = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3$. W rozwiązaniu tych całek otrzymuje się składowe natężenia pola magnetycznego wzdłuż osi Ox i Oy [4]. Rozkłady pola dla przypadku niesymetrycznych prądów przedstawiono na rysunku 2. Wpływ

długości przewodów na rozkład całkowitego pola magnetycznego w takiej linii ilustruje rysunek 3.



Rys. 2. Rozkład modułu pola magnetycznego czteroprzewodowej linii trójfazowej o szynoprzewodach prostokątnych o skończonej długości na płaszczyźnie xOy



Rys. 3. Rozkład modułu pola magnetycznego czteroprzewodowej linii trójfazowej o szynoprzewodach prostokątnych o skończonej długości na płaszczyznach $z=\text{const}$.

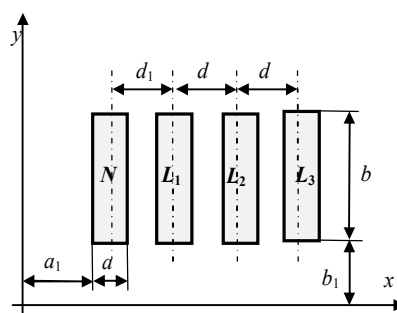
3. STANOWISKO POMIAROWE I ZAKRES BADAŃ

Z wyłączeniem przypadków szczególnych, np. kiedy przewody są równoległe i fazy ich prądów różnią się o π , to pole magnetyczne szynoprzewodzie jest polem eliptycznym. To z pewnością występuje w układach trójfazowych z uwzględnieniem zjawisk naskórkowości i zbliżenia [5, 6]. Pomiar eliptycznego pola magnetycznego z wykorzystaniem sond kierunkowych jest kłopotliwy, ponieważ dla każdego punktu pomiarowego operator musi znaleźć maksimum. Wymaga to większego nakładu czasu i powoduje generację

dużych błędów pomiarowych. Dlatego też budowane są specjalne sondy bezkierunkowe. Jedną z takich konstrukcji jest specyficzny miernik pomiaru natężenia pola magnetycznego i indukcji magnetycznej skonstruowany jako projekt badawczy NN511 312540 sfinansowany przez Narodowe Centrum Nauki Polskiej [7] - rys. 4. Obiektem badań był nieekranowany szynoprzewód wyprodukowany przez Holduct Mysłowice – rysunek 5.



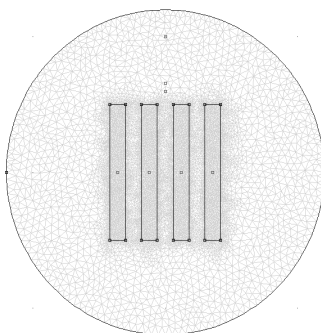
Rys. 4. Przyrząd do pomiaru pola magnetycznego



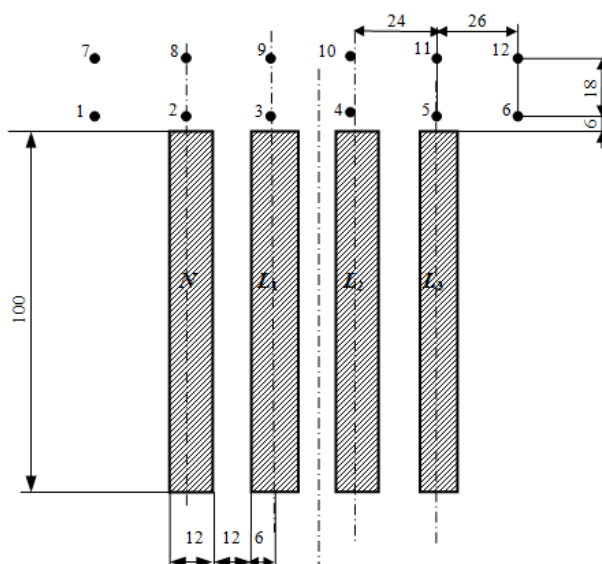
Rys. 5. Nieekranowany szynoprzewód (Holduct Mysłowice)

Natężenie pola magnetycznego porównano ze sobą trzema metodami: metodą równań całkowych (MRC) [8], elementów skończonych (MES) i wykonanymi pomiarami (P). Porównania tego dokonano w wybranych punktach nieekranowanego szynoprzewodu, a położenie tych punktów ilustruje rysunek 7. Zgodnie z rysunkami 5 i 7 wymiary szynoprzewodu wynoszą: $a = 12$ mm, $b = 100$ mm oraz $d = d_1 = 24$ mm. Szyny fazowe i szyna neutralna są szynami miedzianymi o konduktywności $\sigma = 56$ MS·m⁻¹. Częstotliwość prądów fazowych $f = 50$ Hz. Długość rzeczywistego szynoprzewodu badanego w laboratorium wynosiła $l = 3.50$ m.

Dyskretyzację obszaru w metodzie MES z wykorzystaniem komercyjnego oprogramowania FEMM przedstawia rysunek 6.

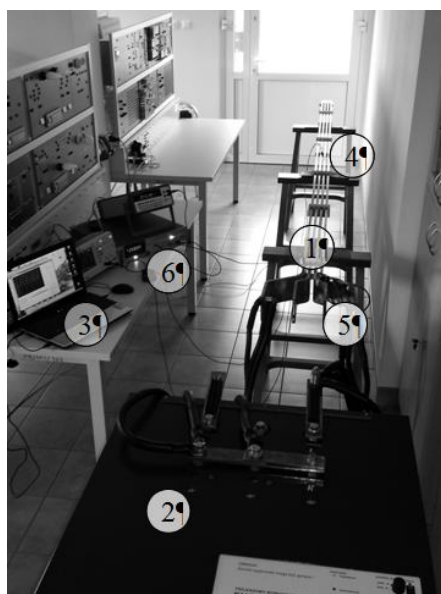


Rys. 6. Metoda elementów skończonych – siatka wygenerowana z programu FEMM



Rys. 7. Przekrój poprzeczny badanego szynoprzewodu - położenie punktów pomiarowych

Pomiary wykonywano w laboratorium inżynierii elektroenergetycznej w Instytucie Inżynierii Środowiska Politechniki Częstochowskiej, które widoczne jest na rysunku 8.



Rys. 8. Stanowisko do badania szynoprzewodu nieekranowanego:

- 1 – szynoprzewód produkcji Holduct,
- 2 – wymuszalnik prądowy,
- 3 – komputer z oprogramowaniem pomiarowym,
- 4 – czujnik pola magnetycznego,
- 5 – cewki Rogowskiego,
- 6 – dodatkowe urządzenia pomiarowe (fazomierz cyfrowy, oscyloskop, woltomierz)

W pierwszej kolejności założono symetryczne wymuszenie prądowe - tabela 1.

Tabela 1. Natężenie pola magnetycznego w wybranych punktach nieekranowanego trójfazowego szynoprzewodu przy symetrii prądowej

Metoda	Natężenie pola magnetycznego w kA/m przy symetrii prądowej o $I = 1$ kA					
	1	2	3	4	5	6
MRC	0.550	1.450	3.150	3.250	4.560	4.250
MES	1.036	2.118	4.778	5.537	4.966	1.818
Pomiar	0.318	1.723	4.041	4.422	3.650	1.419
	7	8	9	10	11	12
MRC	0.600	1.200	1.250	1.850	1.200	0.950
MES	0.873	1.439	2.206	2.547	2.238	1.357
Pomiar	0.754	1.274	2.058	2.296	1.761	1.153

Dla niesymetrycznego wymuszenia prądowego wyniki zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Natężenie pola magnetycznego w wybranych punktach nieekranowanego trójfazowego szynoprzewodu przy asymetrii prądowej

Metoda	Natężenie pola magnetycznego w kA/m przy asymetrii prądowej o prądach: $\underline{I}_1 = 1000 e^{j0^\circ}$ [A], $\underline{I}_2 = 500 e^{-j103^\circ}$ [A], $\underline{I}_3 = 1000 e^{j140^\circ}$ [A], $\underline{I}_N = 197 e^{j52^\circ}$ [A]					
	1	2	3	4	5	6
MRC	1.550	1.850	3.900	3.850	3.500	1.350
MES	1.068	2.250	4.832	4.990	5.075	1.885
Pomiar	0.838	1.723	4.165	4.037	3.708	1.486
	7	8	9	10	11	12
MRC	0.950	1.350	1.950	2.100	1.650	0.980
MES	0.904	1.491	2.238	2.550	2.286	1.403
Pomiar	0.752	1.294	2.107	2.302	1.820	1.209

4. WNIOSKI

Zaprojektowane i wykonane stanowisko badawcze umożliwiło weryfikację eksperymentalną pola magnetycznego w nieekranowanym torze wieloprądowym o szynoprzewodach prostokątnych. Uzyskano zadawalającą zgodność z wartościami obliczanymi z komercyjnego oprogramowania bazującego na dwuwymiarowej metodzie elementów skończonych oraz obliczeniach analityczno-numerycznych. W niektórych punktach różnice wydają

się znaczne. To prawdopodobnie jest wynikiem niedokładnego pozycjonowania sondy podczas wykonywania pomiarów, jak również faktem, że głowica sondy ma znaczne rozmiary np. w stosunku do szczeliny między szynami.

LITERATURA

- [1] Nawrowski R.: Tory wielkoprowadowe izolowane powietrzem lub SF₆, Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań 1998.
- [2] Sarajcev P. and Goic R.: Power Loss Computation in High Current Generator Bus Ducts of Rectangular Cross Section, *Electric Power Components and Systems*, No. 38, 2010, pp. 1469-1485.
- [3] Szczegielniak T., Piątek Z., Kusiak D.: Pole magnetyczne szynoprzewodów prostokątnych o skończonej długości, *Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska (IAPGOŚ)*, Nr 4/2013, s. 45-48.
- [4] Piątek Z., Baron B., Jabłoński P., Szczegielniak T., Kusiak D., Pasierbek A.: A numerical method for current density determination in three-phase bus-bars of rectangular cross section, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.89, nr 8, s. 294-298, 2013.
- [5] Matsuki, M. and A. Matsushima: Improved Numerical Method for Computing Internal Impedance of a Rectangular Conductor and Discussions of its High Frequency Behavior. *Progress in Electromagnetics Research M*, Vol. 23, 139-152, 2012.
- [6] Piątek Z., Baron B., Szczegielniak T., Kusiak D., Pasierbek A., Mutual Inductance of Long Rectangular Conductors, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, R.88, No. 9a, pp.175-177, 2012.
- [7] Pasierbek A., Baron B., Piątek Z., Szczegielniak T., Kusiak D., Komputerowy system pomiarowy z czujnikiem trójosiowym do pomiaru natężenia pola magnetycznego, *Prace Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka*, R. 58 z. 3-4 (223-224), s.61-70, 2012.
- [8] Piątek Z., Baron B., Jabłoński P., Kusiak D., Szczegielniak T., Numerical method of computing impedances in shielded and unshielded three-phase rectangular busbar systems, *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 51, pp. 135-156, 2013.

DETERMINING THE MAGNETIC FIELD IN A NON-SHIELDED 4-WIRES 3-PHASE BUS DUCT SYSTEM WITH RECTANGULAR BUSBARS

The paper presents the results of calculations of the magnetic field in a non-shielded three-phase busbar system manufactured by Holduct Mysłowice. With the discussed formulas can be obtained analytical description of the magnetic field. In addition, also theoretical computations were done with use of finite elements. The measurements were performed with use of a specific non-directional magnetic field probe. The results roughly agree, but at some probing points the differences are considerable, probably due to inaccurate positioning the probe between the bus bars.