

dr inż. Dariusz Kusiak

Zakład Elektrotechniki

Instytut Optoelektroniki i Systemów Pomiarowych

Wydział Elektryczny

Politechnika Częstochowska

ZAŁĄCZNIK 3A

Autoreferat

1. Imię i nazwisko

Dariusz Kusiak

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytuł rozprawy doktorskiej

Magister inżynier, kierunek elektrotechnika, specjalność Informatyka z elementami ekonomii, Wydział Elektryczny, Politechnika Częstochowska, 2004.

Doktor nauk technicznych. Dziedzina nauki: nauki techniczne. Dyscyplina naukowa: Elektrotechnika. Specjalność: Elektrotechnika. Stopień nadany uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej w dniu 22.12.2008 r. na podstawie rozprawy pt. „Pole magnetyczne dwu i trójbiegunowych torów wielkoprądowych”.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Od 15.02.2005 r. do 31.08.2008 r. zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Elektrotechniki, a następnie od 01.11.2008 do 28.02.2009 na stanowisku asystenta w Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej.

Od 01.03.2009 do 28.02.2017 zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Elektrotechniki Przemysłowej, a następnie od 01.03.2017 do 31.01.2019 na stanowisku adiunkta w Katedrze Elektrotechniki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej.

Od 01.02.2019 r. do chwili obecnej zatrudniony na stanowisku adiunkta w Instytucie Optoelektroniki i Systemów Sterowania (w Zakładzie Elektrotechniki) na Wydziale Elektrycznym Politechniki Częstochowskiej.

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) Tytuł osiągnięcia naukowego

Cykl publikacji powiązanych tematycznie pod wspólną nazwą: „**Impedancje własne i wzajemne oraz pole magnetyczne trójfazowych szynoprzewodów prostokątnych**” – cykl zawiera łącznie 15 publikacji.

b) Publikacje lub inne prace wchodzące w skład osiągnięcia naukowego powiązanych tematycznie

1. **Kusiak D.:** The Magnetic Field and Impedances in Three-Phase Rectangular Busbars with a Finite Length, *Energies*, **2019**, 12, pp. 20; doi:10.3390/en12081419

Punkty MNiSW = 25; IF(2017) = 2,676; 5-Year Impact Factor: 3.045 (2017); Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, SCOPUS

2. **Kusiak D., Piątek Z., Szczegielniak T.:** Magnetic Field of a Ribbon Busbar of Finite Length, *ITM Web of Conferences*, Vol.19, 01010, **2018**; doi.org/10.1051/itmconf/20181901010

Punkty MNiSW = 15; Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 34 %

3. Jabłoński P., **Kusiak D.**, Piątek Z., Szczegielniak T.: The effect of busbar shape and arrangement on currents and power losses in 3-phase busducts with two busbars per phase, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.94, nr 1, s. 41-44, **2018**

Punkty MNiSW = 15; Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, SCOPUS

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 25 %

4. **Kusiak D.**, Szczegielniak T.: Obliczenia elektromagnetyczne szynoprzewodów, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, seria *Monografie nr 326*, 177s., Częstochowa, **2017**

Punkty MNiSW = 25; Monografia

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 50 %

5. Szczegielniak T., Piątek Z., Baron B., Jabłoński P., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: A Discrete Numerical Method for Magnetic Field Determination in Three-Phase Busbars of a Rectangular Cross-Section, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 24, s. 1279-1291, **2016**

Punkty MNiSW = 15; IF = 0,578 ; Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, SCOPUS

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 15 %

6. Jabłoński P., **Kusiak D.**, Szczegielniak T., Piątek Z.: Reduction of Impedance Matrices of Power Busducts, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.92, nr 12, s. 49-52, **2016**

Punkty MNiSW = 14; Artykuł indeksowany w bazach: SCOPUS

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 25 %

7. **Kusiak D.**, Piątek Z., Szczegielniak T., Jabłoński P.: Calculations of the Magnetic Field of the Three-Phase 4-Conductor Line with Rectangular Busbars, *Computer Applications in Electrical Engineering*, Vol.14, s. 25-38, **2016**

Punkty MNiSW = 6

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 25 %

8. **Kusiak D.**, Piątek Z., Szczegielniak T., Jabłoński P.: Wyznaczanie pola magnetycznego w nieekranowanym trójfazowym czteroprzewodowym torze wielkoprądowym o szynach prostokątnych, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, Iss.81, ISSN 1897-0737 s.55-62, **2015**

Punkty MNiSW = 6

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 25 %

9. Piątek Z., Baron B., Jabłoński P., Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: A numerical-analytical method for magnetic field determination in three-phase busbars of rectangular cross section, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 91, nr 12, s. 193-197, **2015**

Punkty MNiSW = 14; Artykuł indeksowany w bazach: SCOPUS

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 20 %

10. Szczegielniak T., Piątek Z., **Kusiak D.**: Impedancje własne i wzajemne szynoprzewodów prostokątnych o skończonej długości, *Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska (IAPGOŚ)*, ISSN 2083-0157, Nr 4, s. 21-24, **2014**

Punkty MNiSW = 6

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 33%

11. 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 (PIER)*, B, Vol.51, s. 135-156, **2013**

Artykuł indeksowany w bazach: SCOPUS

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 20 %

12. Piątek Z., Baron B., Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: Exact closed form formula for mutual inductance of conductors of rectangular cross section, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, nr 3a, s. 61-64, **2013**

Punkty MNiSW = 10; Artykuł indeksowany w bazach: SCOPUS

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 20 %

13. Baron B., Piątek Z., Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: Impedance of an isolated rectangular conductor, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, nr 4, s. 278-280, **2013**

Punkty MNiSW = 10; Artykuł indeksowany w bazach: SCOPUS

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 20 %

14. Piątek Z., Baron B., Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: Inductance of a long two-rectangular busbar single-phase line, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, nr 6, s. 290-292, **2013**

Punkty MNiSW = 10; Artykuł indeksowany w bazach: SCOPUS

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 20 %

15. Piątek Z., Baron B., Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: Mutual inductance of long rectangular conductors, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88, nr 9a, s. 175-177, **2012**

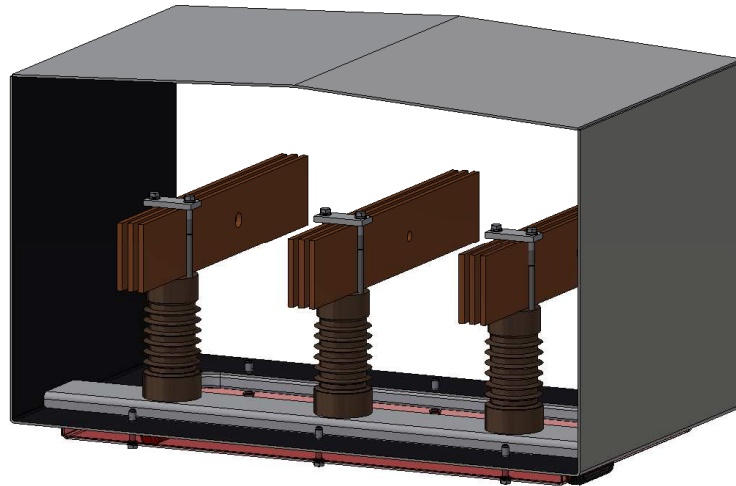
Punkty MNiSW = 15; Artykuł indeksowany w bazach: Web of Science, SCOPUS.

Mój wkład w powstanie tej pracy wyniósł 20 %

c) Omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

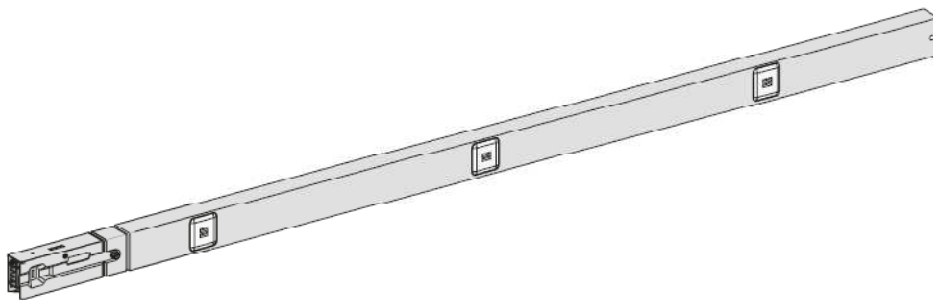
4.1. Opis tematyki badawczej

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. Szyny sztywne wykonuje się przeważnie z pojedynczych płaskowników, jedynie przy większych wartościach prądów – z dwóch lub trzech płaskowników w pakiecie (rysunek 1). Przy bardzo dużych wartościach prądów roboczych stosuje się szyny w postaci ceowników, dwuteowników oraz rur [16-18]. Przewody szynowe stosuje się w urządzeniach rozdzielczych WN, jako: szyny zbiorcze w rozdzielniach, połączenia przyrządów rozdzielczych w rozdzielniach, połączenia transformatorów z rozdzielnicami oraz połączenia generatorów z transformatorami blokowymi [19,20]. W przemysłowych sieciach rozdzielczych nn przewody szynowe zastępują przewody izolowane i kable przy rozdziale energii [4].



Rys. 1. Niesegregowany trójfazowy szynoprzewód prostokątny typu HONR (Holduct, Mysłowice) [21]

Do zasilania urządzeń elektrycznych odbiorczych we wszystkich układach sieciowych o napięciu znamionowym do 1 kV w przemysłowych halach fabrycznych, budownictwie przemysłowym i mieszkaniowym stosuje się prostokątne szynoprzewody okapturzone generalnie typu Canalis - rysunek 2. Mogą być one również wykorzystane jako magistrale zasilające rozdzielnice lub duże pojedyncze odbiory oraz do zasilania dużej liczby średnich i małych pojedynczych odbiorców [22].



Rys. 2. Szynoprzewód do zasilania opraw oświetleniowych i gniazd - Casilas KBA (Schneider Electric) [22]

Dla prądu przemiennego przy wyznaczaniu impedancji własnych i wzajemnych, oprócz zjawiska naskórkowości należy, ze względu na małe odległości między poszczególnymi szynami, uwzględnić także zjawisko zbliżenia [4]. Dopiero na ich podstawie można określać zastępcze impedancje fazowe [1,11].

Prądy znamionowe współcześnie instalowanych szynoprzewodów, zarówno nieosłoniętych jak i osłoniętych, mogą osiągać wartość do 40 kA. W konsekwencji wartości natężeń zmiennych pól magnetycznych emitowanych przez takie szynoprzewody są duże nawet w warunkach znamionowych [23,24]. Pola te, o częstotliwości przemysłowej, oddziałują na własne elementy oraz na szeroko rozumiane otoczenie - inne urządzenia i aparaty elektroenergetyczne, konstrukcje stalowe, elektroniczne obwody sterowania, kontroli i transmisji danych, środowisko naturalne i na człowieka. Przekroczenie przez te pola pewnych dopuszczalnych wartości natężeń prowadzić może do nieprawidłowego funkcjonowania urządzeń elektrycznych, nadmiernego nagrzewania się konstrukcji stalowych, degradacji środowiska naturalnego i może także stwarzać zagrożenia dla człowieka. Wszystkie te problemy można sprowadzić do zagadnień kompatybilności elektromagnetycznej, dla której wymaga się precyzyjnego określania wartości natężeń magnetycznych o częstotliwości przemysłowej [25].

4.2. Cel badań

Celem naukowym podjętych badań było wyznaczenie impedancji własnych i wzajemnych trójfazowych prostokątnych szynoprzewodów oraz pola magnetycznego w ich otoczeniu metodami analitycznymi, analityczno-numerycznymi oraz numerycznymi. Impedancje te uwzględniają zjawiska naskórkowości i zbliżenia. Uzyskano wzory analityczne oraz algorytmy numeryczne określające te wielkości. Ponadto zostały przeprowadzone pomiary sprawdzające na wybranych szynoprzewodach produkowanych przez polskie przedsiębiorstwa.

4.3. Znaczenie badań, metodyka badań i zakres naukowy prac

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.

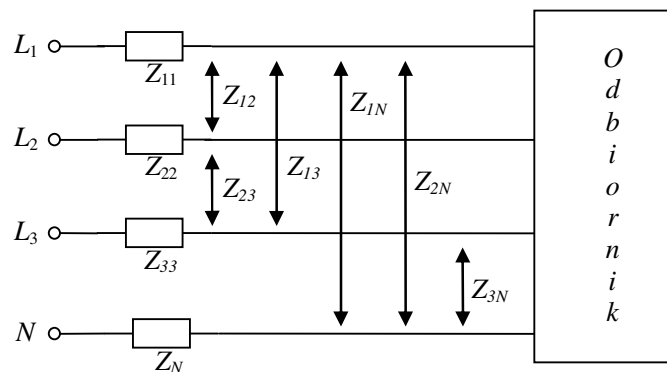
Stąd też duże znaczenie ma dokładne wyznaczenie impedancji własnych i wzajemnych szynoprzewodów różnych typów i konstrukcji, gdyż impedancje te są niezbędne do wyznaczania:

- rozplywu prądów w układach szynoprzewodów,
- spadków napięć w przewodach fazowych szynoprzewodów,
- obciążalności prądem długotrwałym,
- minimalnych wymiarów szynoprzewodu dla zadanego prądu (zagadnienie odwrotne do poprzedniego),
- oddziaływań elektrodynamicznych w torach prądowych w stanach zwarciovych (przy zwarciach),
- cieplnego działania prądu zwarciovego,
- dynamicznego działania prądu zwarciovego (wskutek oddziaływania zarówno prądów różnych faz jak i prądów płynących w poszczególnych płaskownikach tej samej fazy),
- strat cieplnych w torach prądowych,
- strat cieplnych wydzielanych w ekranach (osłonach, obudowach metalowych) torów prądowych.

W każdym przypadku szynoprzewodu należy sprawdzić pole magnetyczne w ich otoczeniu – czy nie przekracza ono wartości dopuszczalnych określonych przez odpowiednią normę [24,26,27].

Badania naukowe prac obejmowały:

- wyznaczenie impedancji własnych i wzajemnych szynoprzewodów prostokątnych o dowolnej długości, tj. określenie parametrów ich schematów zastępczych - rysunek 3,
- wyznaczenie zastępczych (bez sprzężeń) impedancji fazowych,



Rys. 3. Schemat zastępczy układu szynoprzewodów prostokątnych

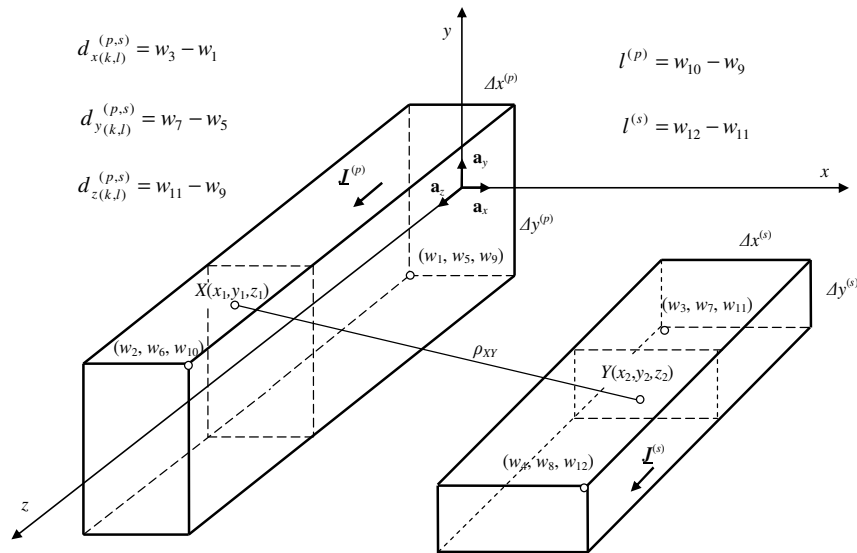
- wyznaczenie rozkładu pola magnetycznego w szynoprzewodach i ich otoczeniu,
- opracowanie algorytmów obliczeniowych impedancji i pól magnetycznych dla szynoprzewodów prostokątnych,
- pomiar impedancji wybranych układów szynoprzewodów,
- pomiar pola magnetycznego w otoczeniu wybranych układów szynoprzewodów,
- porównanie otrzymanych wyników z wynikami otrzymanymi z programu FEMM.

4.4. Stan wiedzy

Wpływ zjawisk naskórkowości i zbliżenia na wartość rezystancji szynoprzewodów prostokątnych określa się tzw. współczynnikiem Dwighta. Indukcyjność własna oraz wzajemna układu takich szynoprzewodów może być określana z wykorzystaniem tzw. średniej geometrycznej odległości przekroju szynoprzewodu od samego siebie w przypadku indukcyjności własnej lub od przekroju szynoprzewodu sąsiedniego w przypadku indukcyjności wzajemnej. Wartość tej średniej geometrycznej odległości podaje się w postaci wzorów, wykresów lub tabel w zależności od tego, czy zjawiska naskórkowości i zbliżenia są lub nie są uwzględniane. Powyższe indukcyjności mogą być wyznaczone w oparciu o metodę elementów skończonych lub też eksperymentalnie. W pracach [14,28] autorzy zastosowali analityczno-numeryczną metodę z wykorzystaniem równań całkowych dla przypadku długich szynoprzewodów uwzględniając przy tym zjawiska naskórkowości i zbliżenia. W pracach [12,13] autorzy stosując metodę równań całkowych wyprowadzili wzory na indukcyjność własną szynoprzewodu prostokątnego o skończonej długości. Również w pracach [14,15] autorzy zastosowali metodę równań całkowych do wyznaczania impedancji odosobnionego szynoprzewodu prostokątnego dla niskiej częstotliwości, dokonując jednocześnie porównania otrzymanych wyników z rezultatami otrzymanymi z obecnie stosowanymi różnymi wzorami dostępnymi w literaturze fachowej. Metoda równań całkowych została również zastosowana do wyznaczania pola magnetycznego w otoczeniu długich szynoprzewodów [8]. Uwzględniono przy tym zjawiska naskórkowości i zbliżenia. Wzory analityczne opisujące pole magnetyczne w szynoprzewodzie prostokątnym przy pominięciu zjawiska naskórkowości przedstawiono w pracach [1,7,8].

4.5. Impedancje własne i wzajemne równoległych szyn prostokątnych

W przypadku dwóch równoległych przewodów prostokątnych (rys. 4) położenie pierwszego przewodu o wymiarach $a_1 \times b_1 \times l_1$ może być określone przez współrzędne jego wierzchołków (s_1, s_5, s_9) oraz (s_2, s_6, s_{10}) . Położenie drugiego przewodu o wymiarach poprzecznych $a_2 \times b_2 \times l_2$ określone jest przez współrzędne jego wierzchołków (s_3, s_7, s_{11}) oraz (s_4, s_8, s_{12}) .



Rys. 4. Dwa równoległe szynoprzewody o przekroju prostokątnym z prądami I_1 oraz I_2 [4]

Jeśli pominie się prądy wirowe indukowane w przewodach sąsiednich, to wtedy impedancja własna l -tego przewodu na podstawie prac [4,12] wynosi

$$\underline{Z}_{ll} = \frac{1}{I_l^2} \int_{v_l} \frac{\underline{J}_{ll}(X) \underline{J}_{ll}^*(X)}{\gamma_l} dv_l + j\omega \frac{\mu_0}{4\pi I_l^2} \int_{v_l} \int_{v_l} \frac{\underline{J}_{ll}(Y) \underline{J}_{ll}^*(X)}{\rho_{XY}} dv_l' dv_l \quad (1)$$

oraz impedancja wzajemna między l -tym a k -tym przewodem

$$\underline{Z}_{lk} = j\omega \frac{\mu_0}{4\pi I_l^* I_k} \int_{v_l} \int_{v_k} \frac{\underline{J}_{kk}(Y) \underline{J}_{ll}^*(X)}{\rho_{XY}} dv_k dv_l \quad (2)$$

Jeśli założy się, że w tych szynoprzewodach są prądy zespolone odpowiednio I_1 oraz I_2 , to spadek napięcia w pierwszym z nich

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{11} I_1 + \underline{Z}_{12} I_2 \quad (3)$$

a spadek napięcia w drugim szynoprzewodzie

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_{22} I_2 + \underline{Z}_{21} I_1 \quad (4)$$

W powyższych wzorach, na podstawie wzoru (1), impedancje własne przewodów wyrażają się wzorami

$$\underline{Z}_{11} = \frac{1}{I_1^2} \int_{v_1} \frac{J_{11}(X) J_{11}^*(X)}{\gamma_1} dv_1 + j\omega \frac{\mu_0}{4\pi I_1^2} \iint_{v_1 v_1} \frac{J_{11}(Y) J_{11}^*(X)}{\rho_{XY}} dv_1 dv_1 \quad (5)$$

oraz

$$\underline{Z}_{22} = \frac{1}{I_2^2} \int_{v_2} \frac{J_{22}(X) J_{22}^*(X)}{\gamma_2} dv_2 + j\omega \frac{\mu_0}{4\pi I_2^2} \iint_{v_2 v_2} \frac{J_{22}(Y) J_{22}^*(X)}{\rho_{XY}} dv_2 dv_2 \quad (6)$$

W powyższych wzorach odległość między punktem źródłowym $X = X(x_1, y_1, z_1)$ a punktem obserwacji $Y = Y(x_2, y_2, z_2)$ dana jest wzorem

$$\rho_{XY} = \sqrt{r_{XY}^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (7)$$

gdzie $r_{XY} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$.

Wtedy też, na mocy (2), impedancje wzajemne są dane następującymi wzorami

$$\underline{Z}_{12} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi I_1 I_2} \iint_{v_1 v_2} \frac{J_{22}(Y) J_{11}^*(X)}{\rho_{XY}} dv_1 dv_2 \quad (8)$$

oraz

$$\underline{Z}_{21} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi I_1 I_2} \iint_{v_1 v_2} \frac{J_{11}(Y) J_{22}^*(X)}{\rho_{XY}} dv_1 dv_2 \quad (9)$$

przy czym

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} \quad (10)$$

Jeśli pominie się zjawiska naskórkowości i zbliżenia lub też rozpatrywane są cienkie szynoprzewody prostokątne, to wtedy można założyć, że gęstości prądów są równomierne [4]. W takich sytuacjach impedancja własna pierwszego szynoprzewodu prostokątnego

$$\underline{Z}_{11} = R_{11} + j\omega L_{11} \quad (11)$$

gdzie rezystancja pierwszego przewodu

$$R_{11} = \frac{l_1}{\gamma_1 a_1 b_1} \quad (12)$$

oraz jego indukcyjność własna

$$L_{11} = \frac{\mu_0}{4\pi a_1^2 b_1^2} \iint_{v_1 v_1} \frac{1}{\rho_{XY}} dv_1 dv_1 \quad (13)$$

Podobnie mamy dla drugiego szynoprzewodu – jego impedancja

$$\underline{Z}_{22} = R_{22} + j\omega L_{22} \quad (14)$$

gdzie jego rezystancja

$$R_{22} = \frac{l_2}{\gamma_2 a_2 b_2} \quad (15)$$

oraz indukcyjność własna

$$L_{22} = \frac{\mu_0}{4\pi a_2^2 b_2^2} \iint_{v_1 v_1} \frac{1}{\rho_{XY}} dv_2 dv_2 \quad (16)$$

Wtedy też impedancje wzajemne są dane następującymi wzorami

$$\underline{Z}_{12} = j \omega M_{12} \quad (17)$$

oraz

$$\underline{Z}_{21} = j \omega M_{21} \quad (18)$$

gdzie indukcyjność wzajemna

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi a_1 b_1 a_2 b_2} \iint_{v_1 v_2} \frac{1}{\rho_{XY}} dv_1 dv_2 = M_{21} = M \quad (19)$$

Jeśli założy się, że rozkłady gęstości prądów w szynoprzewodach prostokątnych są równomierne, to indukcyjności własne i wzajemne szynoprzewodów mogą być wyznaczone odpowiednio ze wzorów (17), (18) oraz (19). Niemniej jednak, dla funkcji podcałkowej ρ_{XY}^{-1} , zagadnienie wyznaczenia analitycznych postaci sześciokrotnych całek oznaczonych w przypadku ogólnym jest na ogół zadaniem trudnym do wykonania. Ale w rozważanym przypadku funkcja ρ_{XY}^{-1} sześciu zmiennych może być sprowadzona do funkcji trzech zmiennych, co znacznie ułatwia rozwiązanie postawionego problemu [29]. Indukcyjność wzajemna między dwoma równoległymi szynoprzewodami prostokątnymi o skończonej długości wyraża się następującym wzorem [29]:

$$\begin{aligned} M &= \frac{\mu_0}{4\pi a_1 a_2 b_1 b_2} \left[\left[\begin{matrix} [F(x, y, z)] \\ (x) \end{matrix} \right]_{\substack{p_1, p_3 \\ q_2, q_4}} \left[\begin{matrix} (y) \\ (z) \end{matrix} \right]_{\substack{q_1, q_3 \\ r_2, r_4}} \right]_{\substack{r_1, r_3 \\ r_2, r_4}} \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi a_1 a_2 b_1 b_2} \sum_{i=1}^{i=4} \sum_{j=1}^{j=4} \sum_{k=1}^{k=4} (-1)^{i+j+k+1} F(p_i, q_j, r_k) \end{aligned} \quad (20)$$

gdzie $a_1 = s_2 - s_1$, $b_1 = s_6 - s_5$, $a_2 = s_4 - s_3$, $b_2 = s_8 - s_7$, $l_1 = s_{10} - s_9$ oraz $l_2 = s_{12} - s_{11}$.

Sześciokrotna całka nieoznaczona przedstawiona w pracy [12,15] ma następującą postać analityczną

$$\begin{aligned} F(x, y, z) &= \iiint \iiint \iiint f(x, y, z) dx dx dy dy dz dz = \\ &= \frac{1}{72} [F_1(x, y, z) + F_1(y, z, x) + F_1(z, x, y)] \end{aligned} \quad (21)$$

gdzie

$$F_1(x, y, z) = \frac{6}{5}x^2(x^2 - 3y^2)\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - 12x^3yz \tan^{-1} \frac{yz}{x\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} - 3x(y^4 - 6y^2z^2 + z^4) \ln\left(x + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}\right) \quad (22)$$

Indukcyjność własna szynoprzewodu o prostokątnym przekroju poprzecznym, dla prądu stałego lub niskiej częstotliwości, dana jest następującym wzorem ogólnym [29]

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a^2 b^2} \left[\left[F(x, y, z) \right]_{\substack{a, -a \\ 0, 0}}^{\substack{b, -b \\ 0, 0}} \right]_{\substack{l, -l \\ 0, 0}}^{\substack{l, -l \\ 0, 0}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{a^2 b^2} \sum_{i=1}^{i=4} \sum_{j=1}^{j=4} \sum_{k=1}^{k=4} (-1)^{i+j+k+1} F(p_i, q_j, r_k) \quad (23)$$

gdzie $p_1 = a$, $p_3 = -a$, $q_1 = b$, $q_3 = -b$, $r_1 = l$, $r_3 = -l$ oraz $p_2 = p_4 = q_2 = q_4 = r_2 = r_4 = 0$.

Wzór (23) umożliwia analityczne wyznaczenie indukcyjności własnej szynoprzewodu prostokątnego jako [29]

$$L(\Delta x, \Delta y, l) = \frac{\mu_0}{120\pi(\Delta x \Delta y)^2} [F_2(\Delta x, \Delta y, l) + F_2(\Delta y, l, \Delta x) + F_2(l, \Delta x, \Delta y)] \quad (24)$$

gdzie

$$F_2(x, y, z) = 4x^5 + 4(x^4 - 3x^2y^2 + y^4)\sqrt{x^2 + y^2} + 4x^2(x^2 - 3y^2)\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - 40x^3yz \tan^{-1} \frac{yz}{x\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + 30x^2y^2z \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - z} - 5x \left[y^4 \ln \frac{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + x)(\sqrt{x^2 + y^2} - x)}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - x)(\sqrt{x^2 + y^2} + x)} + z^4 \ln \frac{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + x)(\sqrt{x^2 + z^2} - x)}{(\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - x)(\sqrt{x^2 + z^2} + x)} \right] \quad (25)$$

4.6. Pomiar impedancji układów szynoprzewodów prostokątnych

Impedancje szynoprzewodów wyznaczano następującymi metodami:

- Metodą analityczną (**AM** – Analytical Method) dla prostych konfiguracji szynoprzewodów nieekranowanych bez uwzględniania zjawisk naskórkowości i zbliżenia.
- Metodą analityczno-numeryczną bazującą na równaniach całkowych (**IEM** – Integral Equation Method) [1,4,5,7,9,10].
- Dwuwymiarową metodą elementów skończonych (**FEM** – Finite Element Method) z wykorzystaniem oprogramowania FEMM [30,31].

- Metodą pomiarową (**MM** – **M**asurement **M**ethod) na stanowisku badawczym w laboratorium inżynierii elektroenergetycznej Politechniki Częstochowskiej (rysunek 5).

a)

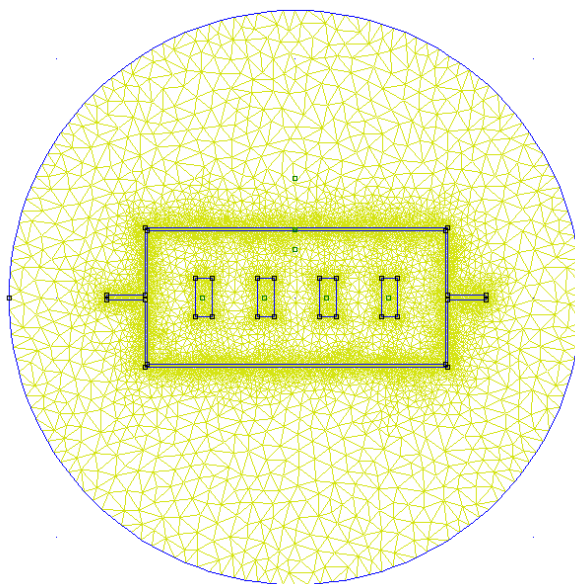


b)



Rys. 5. Szynoprzewód typu MR wyprodukowany przez firmę Elektromontaż nr 2 w Katowicach:
a) stanowisko badawcze, b) układ pomiarowy do pomiaru pola magnetycznego

Obiektem badań były szynoprzewody produkowane przez polskie przedsiębiorstwa. Badano zarówno wersje nieekranowane jak i ekranowane [1,3,4,5,9]. W przypadku szynoprzewodu typu MR 250 (Elektromontaż nr 2 w Katowicach) dyskretyzację ich obszarów w metodzie **FEM** z wykorzystaniem komercyjnego oprogramowania **FEMM** [30] przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Dyskretyzacja szynoprzewodu typu MR (wersja ekranowana)

Dla szynoprzewodu MR przewody fazowe oraz przewód neutralny zawierają po jednej szynie prostokątnej, a stąd $N_1 = N_2 = N_3 = 1$ oraz $N_4 = 1$ (patrz prace [1,4,9,10]). Częstotliwość prądów fazowych $f = 50$ Hz. Do obliczeń przyjęto $l = 1$ m oraz $l = 2.95$ m. Ta ostatnia długość jest jednocześnie długością rzeczywistego szynoprzewodu badanego w laboratorium. Każda z szyn została podzielona na $N_x^{(i,k)} = 7$ oraz $N_y^{(i,k)} = 16$, co daje 112 prostokątnych szyn elementarnych na każdą szynę [1,4,9,10], czyli całkowita liczba szyn elementarnych o wymiarach 1×1 mm wynosi 448. Pozioma płyta obudowy zostaje podzielona na $N_x^{(5,k)} = 127$ oraz $N_y^{(5,k)} = 1$, co daje 127 elementarnych przewodów prostokątnych o wymiarach 1×1 mm [1,4]. Pionowa płyta obudowy zostaje podzielona na $N_y^{(5,k)} = 56$ oraz $N_x^{(5,k)} = 1$, co daje 56 przewodów elementarnych o wymiarach 1×1 mm. W ten sposób osłona zostaje podzielona na 366 prostokątnych przewodów elementarnych. Zatem całkowita liczba prostokątnych przewodów elementarnych szynoprzewodu z rysunku 6 wynosi 814. Po wykonaniu przedstawionej wyżej dyskretyzacji oblicza się impedancje własne i wzajemne nieekranowanego i ekranowanego szynoprzewodu z jedną szyną prostokątną na fazę i z jedną szyną neutralną. Wyniki obliczeń przedstawiono w Tabeli 1.

Otrzymane wyniki obliczeń impedancji własnych i wzajemnych przedstawione w Tabeli 1 umożliwiają wyznaczenie zredukowanych impedancji własnych i wzajemnych [1,6,11]. Impedancje te zamieszczono w Tabeli 2. W tabeli tej podano także wyniki pomiarów tych impedancji.

W macierzy impedancji 4x4 (Tabela 1) należy zwrócić uwagę na znaczne różnice między reaktancjami obliczanymi metodą **IEM** a reaktancjami wyznaczanymi metodą **FEM**. Wynika to ze słabej interpretacji fizycznej impedancji własnych i wzajemnych szynoprzewodu [1,12-15]. Jeśli zaś rozpatrzy się fizyczne znaczenie tych reaktancji opisane macierzą impedancji 3x3 (Tabela 2), to różnice pomiędzy tymi reaktancjami obliczanymi metodą **IEM** oraz **FEM** w praktyce znikają, przy czym należy dodatkowo uwzględnić fakt, że w metodzie **IEM** te reaktancje są obliczane dla szynoprzewodu o skończonej długości podczas gdy w metodzie **FEM** na jednostkę długości (szyny o dużej długości) [1,4,5,11].

Tabela 1. Impedancje własne i wzajemne w $m\Omega$ nieekranowanego (*) i ekranowanego (**) trójfazowego szynoprzewodu typu MR 250

Długość l w m	N_j		Metoda	1 (L1)	2 (L2)	3 (L3)	4 (N)
	N_i	** *					
1	1 (L1)	*	AM	0.159+j 0.312	0.000+j 0.210	0.000+j 0.169	0.000+j 0.210
			IEM	0.160+j 0.311	0.000+j 0.207	0.000+j 0.163	0.000+j 0.207
			FEM	0.160+j 0.446	0.000+j 0.343	0.000+j 0.301	0.000+j 0.343
		**	IEM	0.163+j 0.311	0.001+j 0.207	-0.001+j 0.163	0.002+j 0.206
			FEM	0.163+j 0.445	0.001+j 0.343	-0.001+j 0.301	0.002+j 0.342
	2 (L2)	*	AM	0.000+j 0.210	0.159+j 0.312	0.000+j 0.210	0.000+j 0.169
			IEM	0.000+j 0.207	0.160+j 0.311	0.000+j 0.207	0.000+j 0.163
			FEM	0.000+j 0.343	0.160+j 0.446	0.000+j 0.343	0.000+j 0.300
		**	IEM	0.001+j 0.207	0.163+j 0.311	0.003+j 0.206	-0.002+j 0.163
			FEM	0.001+j 0.343	0.163+j 0.445	0.003+j 0.342	-0.002+j 0.301
	3 (L3)	*	AM	0.000+j 0.169	0.000+j 0.210	0.159+j 0.312	0.000+j 0.145
			IEM	0.000+j 0.163	0.000+j 0.207	0.160+j 0.311	0.000+j 0.136
			FEM	0.000+j 0.301	0.000+j 0.343	0.160+j 0.446	0.000+j 0.275
		**	IEM	-0.001+j 0.163	0.003+j 0.206	0.168+j 0.309	-0.006+j 0.137
			FEM	-0.001+j 0.342	0.003+j 0.342	0.166+j 0.444	-0.006+j 0.277
	4 (N)	*	AM	0.000+j 0.210	0.000+j 0.169	0.000+j 0.145	0.159+j 0.312
			IEM	0.000+j 0.207	0.000+j 0.163	0.000+j 0.136	0.160+j 0.311
			FEM	0.000+j 0.343	0.000+j 0.300	0.000+j 0.275	0.160+j 0.446
		**	IEM	0.002+j 0.206	-0.002+j 0.163	-0.006+j 0.137	0.166+j 0.301
			FEM	0.002+j 0.342	-0.002+j 0.301	-0.006+j 0.277	0.166+j 0.444
2.95	1 (L1)	*	AM	0.470+j 1.121	0.000+j 0.817	0.000+j 0.693	0.000+j 0.817
			IEM	0.473+j 1.120	0.000+j 0.814	0.000+j 0.687	0.000+j 0.814
			FEM	0.472+j 1.315	0.000+j 1.011	0.000+j 0.888	0.000+j 1.011
		**	IEM	0.480+j 1.119	0.003+j 0.814	-0.004+j 0.688	0.007+j 0.813
			FEM	0.480+j 1.312	0.003+j 1.011	-0.003+j 0.888	0.006+j 1.009
	2 (L2)	*	AM	0.000+j 0.817	0.470+j 1.121	0.000+j 0.817	0.000+j 0.693
			IEM	0.000+j 0.814	0.473+j 1.120	0.000+j 0.814	0.000+j 0.687
			FEM	0.000+j 1.011	0.472+j 1.315	0.000+j 1.011	0.000+j 0.885
		**	IEM	0.003+j 0.814	0.481+j 1.119	0.009+j 0.812	-0.006+j 0.688
			FEM	0.003+j 1.011	0.480+j 1.312	0.009+j 1.009	-0.006+j 0.888
	3 (L3)	*	AM	0.000+j 0.693	0.000+j 0.817	0.470+j 1.121	0.000+j 0.620
			IEM	0.000+j 0.687	0.000+j 0.814	0.472+j 1.120	0.000+j 0.612
			FEM	0.000+j 0.888	0.000+j 1.011	0.472+j 1.315	0.000+j 0.811
		**	IEM	-0.004+j 0.688	0.009+j 0.812	0.493+j 1.115	-0.017+j 0.615
			FEM	-0.003+j 0.888	0.009+j 1.009	0.490+j 1.310	-0.017+j 0.817
	4 (N)	*	AM	0.000+j 0.817	0.000+j 0.693	0.000+j 0.620	0.470+j 1.121
			IEM	0.000+j 0.814	0.000+j 0.687	0.000+j 0.612	0.472+j 1.120
			FEM	0.000+j 1.011	0.000+j 0.885	0.000+j 0.811	0.472+j 1.315
		**	IEM	0.007+j 0.813	-0.006+j 0.688	-0.017+j 0.615	0.488+j 1.117
			FEM	0.006+j 1.009	-0.006+j 0.888	-0.017+j 0.817	0.489+j 1.298

* - bez obudowy; ** - z obudową

Tabela 2. Zredukowane impedancje własne i wzajemne w mΩ nieekranowanego (*) i ekranowanego (**) trójfazowego szynoprzewodu typu MR 250

Długość <i>l</i> w m	<i>i</i> \ <i>j</i>		Metoda	1 (L1)	2 (L2)	3 (L3)
	*	**				
2.95	1 (L1)	*	AM	0.940+j 0.608	0.470+j 0.427	0.470+j 0.376
			IEM	0.944+j 0.611	0.472+j 0.432	0.472+j 0.381
			FEM	0.945+j 0.605	0.473+j 0.428	0.472+j 0.377
		**	IEM	0.954+j 0.609	0.491+j 0.428	0.494+j 0.376
			FEM	0.955+j 0.603	0.491+j 0.424	0.495+j 0.372
			MM	0.992+j 0.675	0.578+j 0.549	0.582+j 0.509
	2 (L2)	*	AM	0.470+j 0.427	0.941+j 0.855	0.470+j 0.623
			IEM	0.472+j 0.432	0.945+j 0.865	0.473+j 0.634
			FEM	0.473+j 0.428	0.946+j 0.855	0.473+j 0.627
		**	MM	0.517+j 0,434	1.051+j 0.874	0.495+j 0.690
			IEM	0.491+j 0.428	0.981+j 0.858	0.522+j 0.625
			FEM	0.491+j 0.424	0.982+j 0.848	0.532+j 0.616
	3 (L3)	*	MM	0.575+j 0.559	1.078+j 1.068	0.649+j 0.991
			AM	0.470+j 0.376	0.470+j 0.623	0.940+j 1.000
			IEM	0.472+j 0.381	0.473+j 0.634	0.945+j 1.007
		**	FEM	0.472+j 0.377	0.473+j 0.627	0.946+j 1.004
			MM	0.521+j 0.373	0.494+j 0.690	1.027+j 1.063
			IEM	0.494+j 0.376	0.522+j 0.625	1.017+j 1.001
			FEM	0.495+j 0.372	0.532+j 0.616	1.017+j 0.988
			MM	0.575+j 0.565	0.617+j 1.054	1.145+j 1.511

* - bez obudowy; ** - z obudową

Zmierzone wartości rezystancji oraz reaktancji są mniejsze od obliczonych mniej niż 10% w przypadku szynoprzewodów nieekranowanych. W przypadku ekranowanych szynoprzewodów typu MR zmierzone wartości rezystancji są większe od obliczonych o około 20% , zaś reaktancje są większe nawet ponad 50 % od obliczonych. Wynika to z faktu, że osłona tego typu szynoprzewodu jest w dużym stopniu osłoną profilowaną z oknami, czyli w dużej mierze odbiegającą od idealnego prostokąta przyjętego do obliczeń [1,4].

4.7. Pole magnetyczne szynoprzewodów prostokątnych o skończonej długości

Pole magnetyczne dla różnego typu szynoprzewodów zostało zbadane dla wersji z osłoną i bez osłony.

4.7.1. Gęstości prądów w szynoprzewodach prostokątnych

Znajomość spadków napięć na poszczególnych przewodach U_j dla $j = 1,2,3,4,5$ [1,4,11] zgodnie z podstawieniem

$$\underline{U}_{jt}^{(n)} = \underline{U}_j \quad (26)$$

pozwala na mocy wzoru

$$\underline{I}_{i,k}^{(m)} = \sum_{j=1}^5 \sum_{l=1}^{N_j} \sum_{n=1}^{N_{j,l}} Y_{(i,k)(j,l)}^{(m,n)} \underline{U}_{j,l}^{(n)} \quad (27)$$

gdzie $i = 1, 2, 3, 4, 5$; $k = 1, 2, \dots, N_i$; $m = 1, 2, \dots, N_{i,k}$, obliczyć prąd w dowolnym m -tym włóknie k -tego przewodu i -tej fazy

$$\underline{I}_{i,k}^{(m)} = \sum_{j=1}^5 \left(\sum_{l=1}^{N_j} \sum_{n=1}^{N_{j,l}} Y_{(i,k)(j,l)}^{(m,n)} \underline{U}_{j,l}^{(n)} \right) \quad (28)$$

Po obliczeniu prądów we wszystkich elementarnych przewodach zgodnie ze wzorem

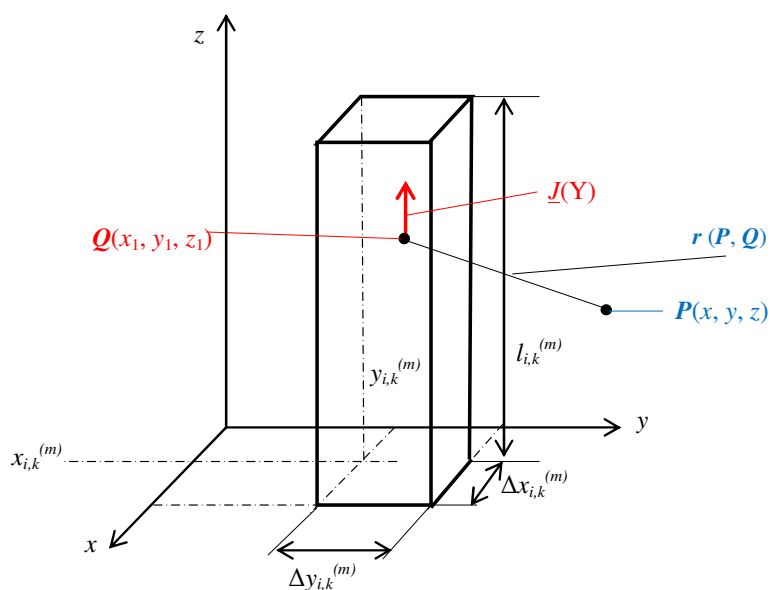
$$\underline{J}_{i,k}^{(m)} = \frac{\underline{J}_{i,k}^{(m)}}{S_{i,k}^{(m)}} \quad (29)$$

można wyznaczyć rozkład gęstości prądu w szynoprzewodach i ekranie.

4.7.2. Pole magnetyczne szynoprzewodów prostokątnych

Znajomość gęstości prądu w poszczególnych przewodach elementarnych szynoprzewodów pozwala obliczyć rozkład pola magnetycznego [1,4,7,8,9]. Pole magnetyczne generowane przez znaną gęstość prądu takiego przewodu elementarnego można wyznaczyć za pomocą potencjału wektorowego generowanego w przestrzeni przez ten prąd. Dla elementarnego przewodu przedstawionego na rysunku 7, potencjał ten dany jest wzorem

$$\underline{A}_{i,k}^{(m)}(\mathbf{P}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_{v_{i,k}^{(m)}} \frac{\underline{J}_{i,k}^{(m)}(\mathbf{Q})}{r(\mathbf{P}, \mathbf{Q})} dV_Q = \mathbf{1}_z \underline{A}_{i,k}^{(m)}(x, y, z) \quad (30)$$



Rys. 7. Lokalizacja $v_{i,k}^{(m)}$ m -tego przewodu elementarnego i -tej fazy k -tego przewodu

Na mocy wzoru (29) składowa w kierunku osi Oz wektorowego potencjału magnetycznego wyraża się wzorem

$$\underline{A}_{i,k}^{(m)}(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_{i,k}^{(m)}}{S_{i,k}^{(m)}} \int_0^{l_{i,k}^{(m)}} \int_{y_{i,k}^{(m)}}^{y_{i,k}^{(m)} + \Delta y_{i,k}^{(m)}} \int_{x_{i,k}^{(m)}}^{x_{i,k}^{(m)} + \Delta x_{i,k}^{(m)}} \frac{dx_1 dy_1 dz_1}{\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-x_1)^2 + (z-x_1)^2}} \quad (31)$$

Jeżeli $l_{i,k}^{(m)} \gg \Delta x_{i,k}^{(m)}$ oraz $l_{i,k}^{(m)} \gg \Delta y_{i,k}^{(m)}$ oraz punkt $P(x, y, z)$ jest dostatecznie odległy od elementu $v_{i,k}^{(m)}$ a więc $|x-x_1| \gg \Delta x_{i,k}^{(m)}$ oraz $|y-y_1| \gg \Delta y_{i,k}^{(m)}$ to całkę potrójną (31) można obliczyć z wystarczającą dokładnością, całkując tylko wzdłuż osi z, otrzymując

$$\begin{aligned} \underline{A}_{i,k}^{(m)}(x, y, z) &= \\ &= \frac{\mu_0 I_{i,k}^{(m)}}{4\pi} \int_0^{l_{i,k}^{(m)}} \frac{dz_1}{\sqrt{\left(x - x_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2} \Delta x_{i,k}^{(m)}\right)^2 + \left(y - y_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2} \Delta y_{i,k}^{(m)}\right)^2 + (z - x_1)^2}} \end{aligned} \quad (32)$$

Znajomość potencjału wektorowego pozwala wyznaczyć natężenie pola magnetycznego w postaci

$$\begin{aligned} \underline{H}_{i,k}^{(m)}(x, y, z) &= \\ &= \frac{1}{\mu_0} \text{rot} \underline{A}_{i,k}^{(m)}(x, y, z) = \mathbf{1}_x \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \underline{A}_{i,k}^{(m)}(x, y, z)}{\partial y} - \mathbf{1}_y \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \underline{A}_{i,k}^{(m)}(x, y, z)}{\partial x} \end{aligned} \quad (33)$$

czyli

$$\underline{H}_{i,k}^{(m)}(x, y, z) = \mathbf{1}_x \underline{H}_{x,i,k}^{(m)} + \mathbf{1}_y \underline{H}_{y,i,k}^{(m)} \quad (34)$$

gdzie składowe natężenia pola magnetycznego

$$\underline{H}_{x,i,k}^{(m)} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \underline{A}_{i,k}^{(m)}(x, y, z)}{\partial y} \quad (35)$$

oraz

$$\underline{H}_{y,i,k}^{(m)} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial \underline{A}_{i,k}^{(m)}(x, y, z)}{\partial x} \quad (36)$$

Zatem składowe te wyrażają się poprzez następujące całki:

$$\begin{aligned} \underline{H}_{x,i,k}^{(m)}(x, y, z) &= \\ &= \frac{I_{i,k}^{(m)}}{4\pi} \int_0^{l_{i,k}^{(m)}} \frac{-\left(y - y_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta y_{i,k}^{(m)}\right) dz_1}{\left[\left(x - x_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta x_{i,k}^{(m)}\right)^2 + \left(y - y_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta y_{i,k}^{(m)}\right)^2 + (z - x_1)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \end{aligned} \quad (37)$$

oraz

$$\begin{aligned} \underline{H}_{y,i,k}^{(m)}(x, y, z) &= \\ &= \frac{I_{i,k}^{(m)}}{4\pi} \int_0^{l_{i,k}^{(m)}} \frac{\left(x - x_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta x_{i,k}^{(m)}\right) dz_1}{\left[\left(x - x_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta x_{i,k}^{(m)}\right)^2 + \left(y - y_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta y_{i,k}^{(m)}\right)^2 + (z - x_1)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \end{aligned} \quad (38)$$

Całki oznaczone (37) i (38) można obliczyć przy pomocy funkcji standardowych gdyż odpowiednia całka nieoznaczona $\mathfrak{S}(z, a, b)$, gdzie $\xi = z - z_1$, ma postać analityczną

$$\mathfrak{S}(z, a, b) = \int \frac{b d\xi}{[a^2 + b^2 + \xi^2]^{3/2}} = \frac{b}{a^2 + b^2} \frac{\xi}{\sqrt{a^2 + b^2 + \xi^2}} \quad (39)$$

Powyższe rozwiązanie pozwala na przedstawienie składowych natężenia pola magnetycznego w następujących postaciach:

$$\underline{H}_{x,i,k}^{(m)}(x, y, z) = \frac{I_{i,k}^{(m)}}{4\pi} \left[\frac{\mathfrak{S}(z, x - x_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta x_{i,k}^{(m)}, y - y_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta y_{i,k}^{(m)}) - \mathfrak{S}(l_{i,k}^{(m)} - z, x - x_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta x_{i,k}^{(m)}, y - y_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta y_{i,k}^{(m)})}{4\pi} \right] \quad (40)$$

oraz

$$\underline{H}_{y,i,k}^{(m)}(x, y, z) = -\frac{I_{i,k}^{(m)}}{4\pi} \left[\frac{\mathfrak{S}(z, y - y_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta y_{i,k}^{(m)}, x - x_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta x_{i,k}^{(m)}) - \mathfrak{S}(l_{i,k}^{(m)} - z, y - y_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta y_{i,k}^{(m)}, x - x_{i,k}^{(m)} - \frac{1}{2}\Delta x_{i,k}^{(m)})}{4\pi} \right] \quad (41)$$

Ostatecznie, całkowite pole magnetyczne w otoczeniu szynoprzewodu będzie superpozycją pól cząstkowych generowanych przez prądy we wszystkich jego przewodach elementarnych, czyli

$$\underline{H}_x(x, y, z) = \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{k=1}^{N_i} \sum_{m=1}^{N_{i,k}} \underline{H}_{x,i,k}^{(m)}(X) \quad (42)$$

oraz

$$\underline{H}_y(x, y, z) = \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{k=1}^{N_i} \sum_{m=1}^{N_{i,k}} \underline{H}_{y,i,k}^{(m)}(X) \quad (43)$$

i wtedy

$$\underline{H}(x, y, z) = \mathbf{1}_x \underline{H}_x(x, y, z) + \mathbf{1}_y \underline{H}_y(x, y, z) \quad (44)$$

W trójfazowym układzie szynoprzewodów pole magnetyczne jest polem eliptycznym [1,4,32]. Jego wartość chwilowa

$$\mathbf{H}(x, y, z, t) = \mathbf{1}_x \sqrt{2} \operatorname{Re}(\underline{H}_x e^{j\alpha t}) + \mathbf{1}_y \sqrt{2} \operatorname{Re}(\underline{H}_y e^{j\alpha t}) \quad (45)$$

Największa wartość pola magnetycznego wynosi wtedy [32]

$$H_{\max}(x, y, z) = \max_{0 \leq t \leq T} \frac{|\mathbf{H}(x, y, z, t)|}{\sqrt{2}} = |\underline{H}_1(x, y, z)| + |\underline{H}_2(x, y, z)| \quad (46)$$

zaś najmniejsza

$$H_{\min}(x, y, z) = \min_{0 \leq t \leq T} \frac{|\mathbf{H}(x, y, z, t)|}{\sqrt{2}} = \left| |\underline{H}_1(x, y, z)| - |\underline{H}_2(x, y, z)| \right| \quad (47)$$

gdzie

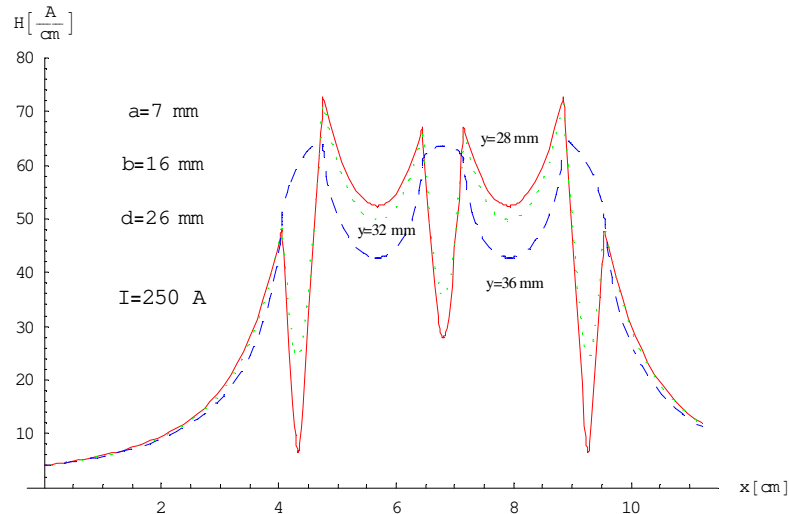
$$\underline{H}_1(x, y, z) = \frac{\underline{H}_x(x, y, z) + j \underline{H}_y(x, y, z)}{2} \quad (48)$$

oraz

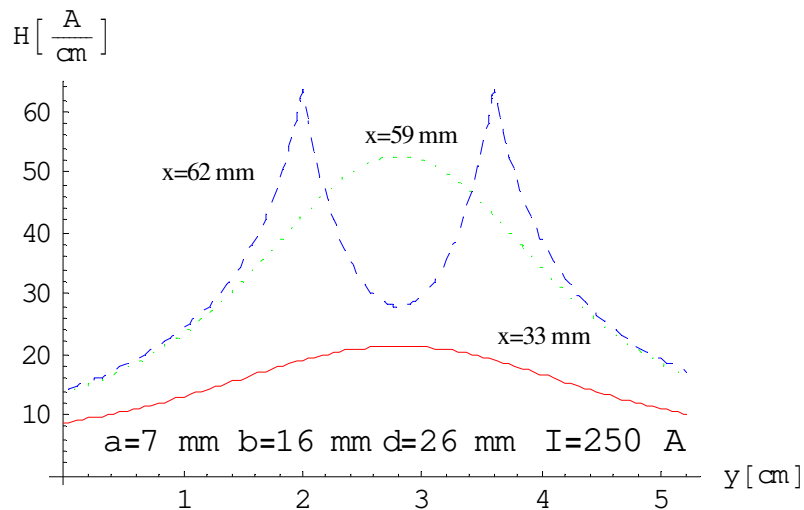
$$\underline{H}_2(x, y, z) = \frac{\underline{H}_x^*(x, y, z) + j \underline{H}_y^*(x, y, z)}{2} \quad (49)$$

4.7.3. Pomiar pola magnetycznego

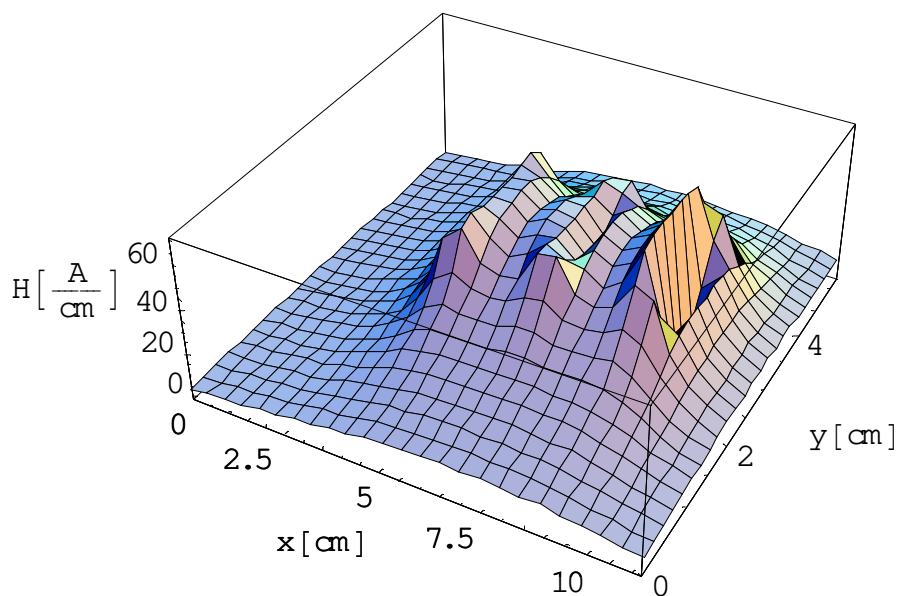
Założono symetryczne wymuszenie prądowe [4,7]. Wtedy, metodą analityczną (AM) [1,4], pomijając zjawiska naskórkowości i zbliżenia, wyznaczono rozkłady natężenia pola magnetycznego dla szynoprzewodu nieekranowanego (rysunki 8, 9 i 10).



Rys. 8. Rozkład natężenia pola magnetycznego wzdłuż linii $y = \text{const}$. nieekranowanego szynoprzewodu typu MR 250 przy symetrii prądowej z prądem $I = 250 \text{ A}$

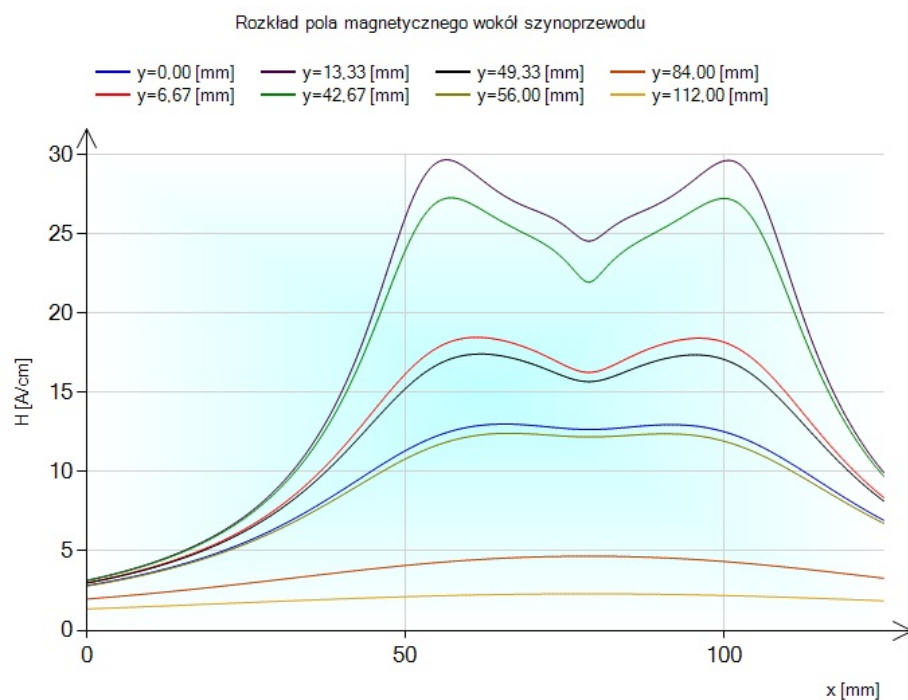


Rys. 9. Rozkład natężenia pola magnetycznego wzdłuż linii $x = \text{const}$. nieekranowanego szynoprzewodu typu MR 250 przy symetrii prądowej z prądem $I = 250 \text{ A}$

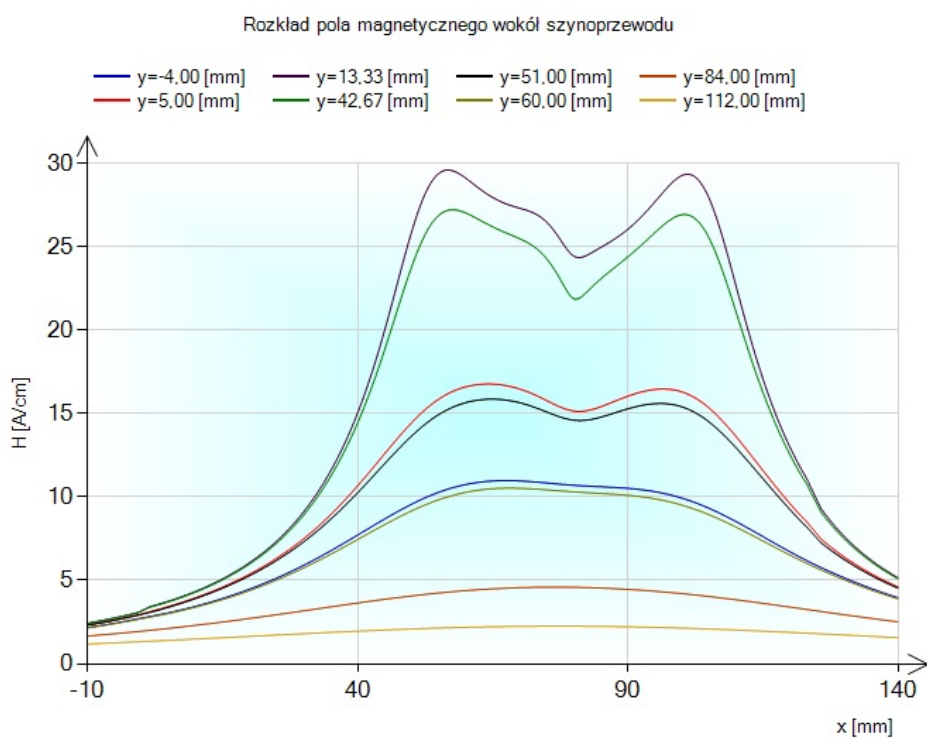


Rys. 10. Przestrzenny rozkład natężenia pola magnetycznego nieekranowanego szynoprzewodu typu MR 250 przy symetrii prądowej z prądem $I = 250 \text{ A}$

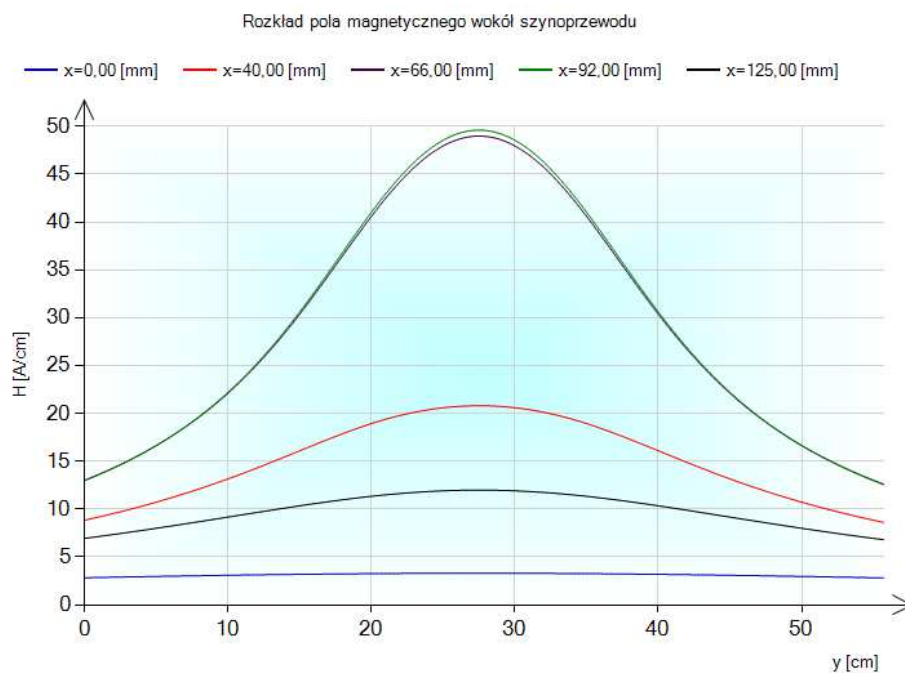
Jeśli uwzględnia się zjawiska naskórkowości i zbliżenia, to w celu wyznaczenia rozkładu natężenia pola magnetycznego nieekranowanego i ekranowanego szynoprzewodu typu HONR, należy zastosować metodę analityczno-numeryczną (IEM) [1,4,7,8,9,11]. Odpowiednie wykresy przedstawiono na rysunkach 11-18.



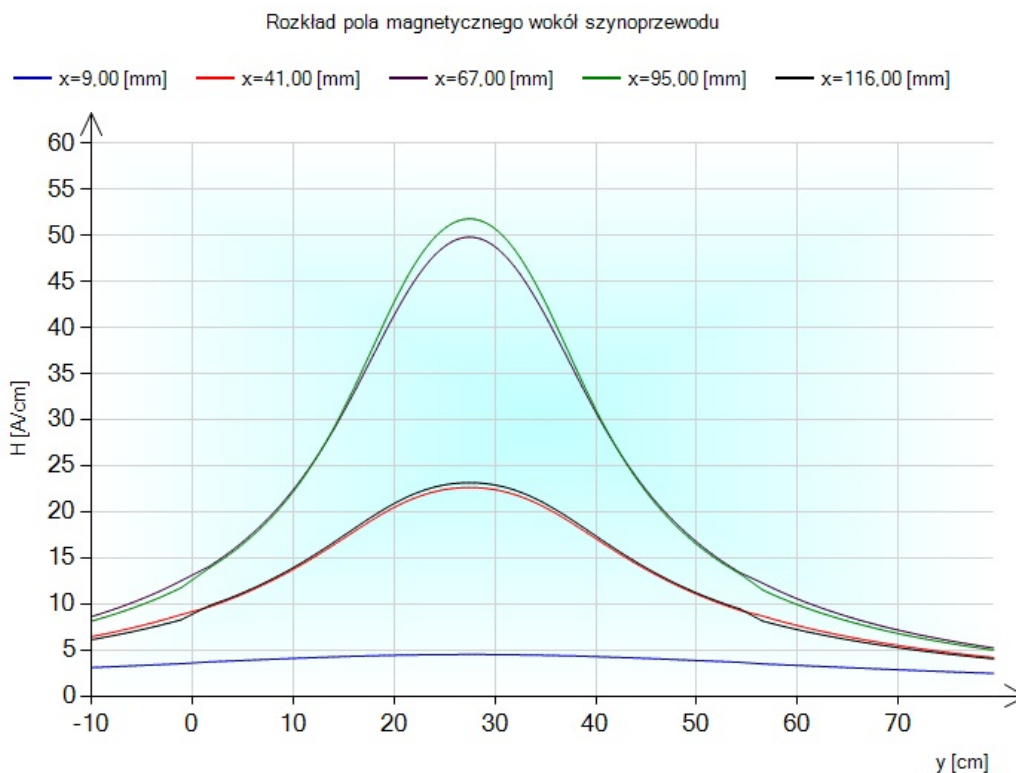
Rys. 11. Rozkład natężenia pola magnetycznego nieekranowanego szynoprzewodu typu MR 250 dla $x = \text{var}$ oraz różnych wartości $y = \text{const}$. w przypadku symetrii prądowej z prądem $I = 250$ A



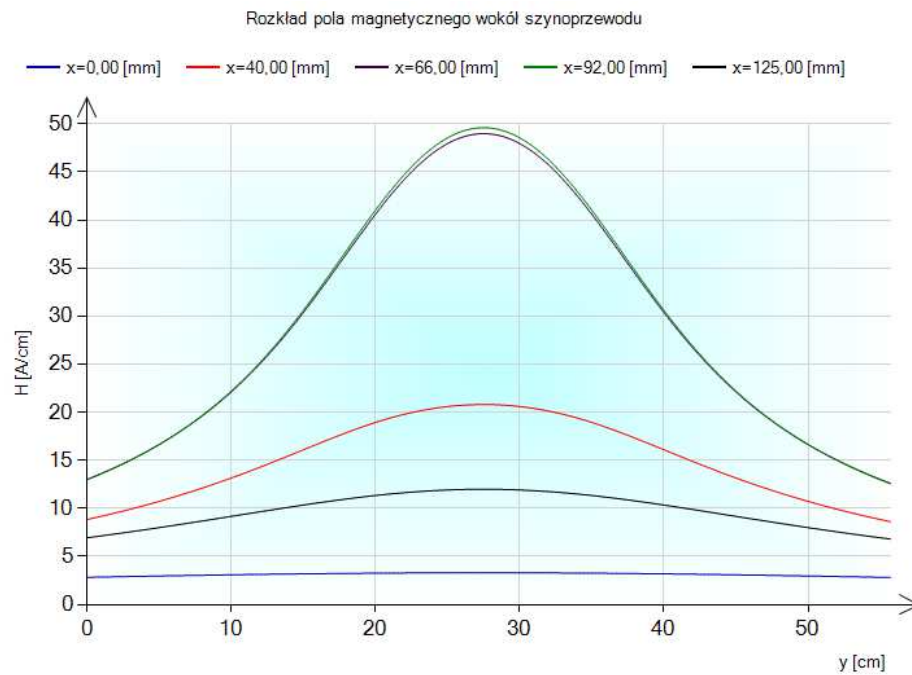
Rys. 12. Rozkład natężenia pola magnetycznego ekranowanego szynoprzewodu typu MR 250 dla $x = \text{var}$ oraz różnych wartości $y = \text{const}$. w przypadku symetrii prądowej z prądem $I = 250$ A



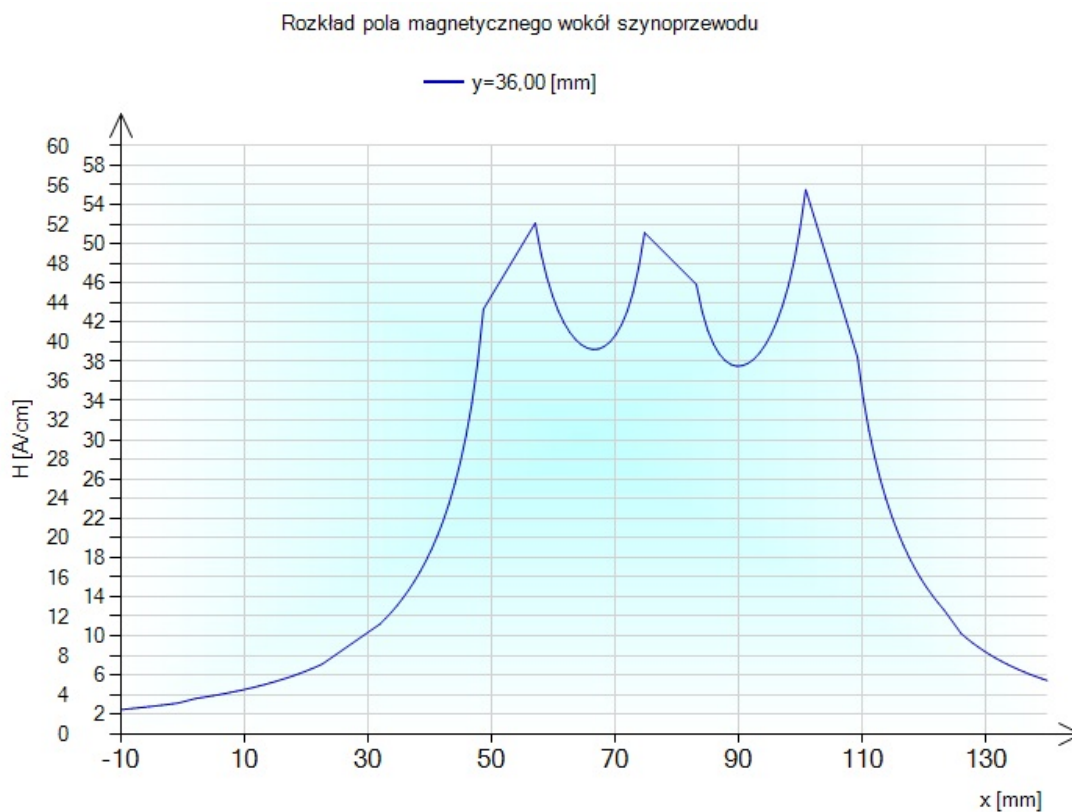
Rys. 13. Rozkład natężenia pola magnetycznego nieekranowanego szynoprzewodu typu MR 250 dla $y = \text{var}$ oraz różnych wartości $x = \text{const.}$ w przypadku symetrii prądowej z prądem $I = 250$ A



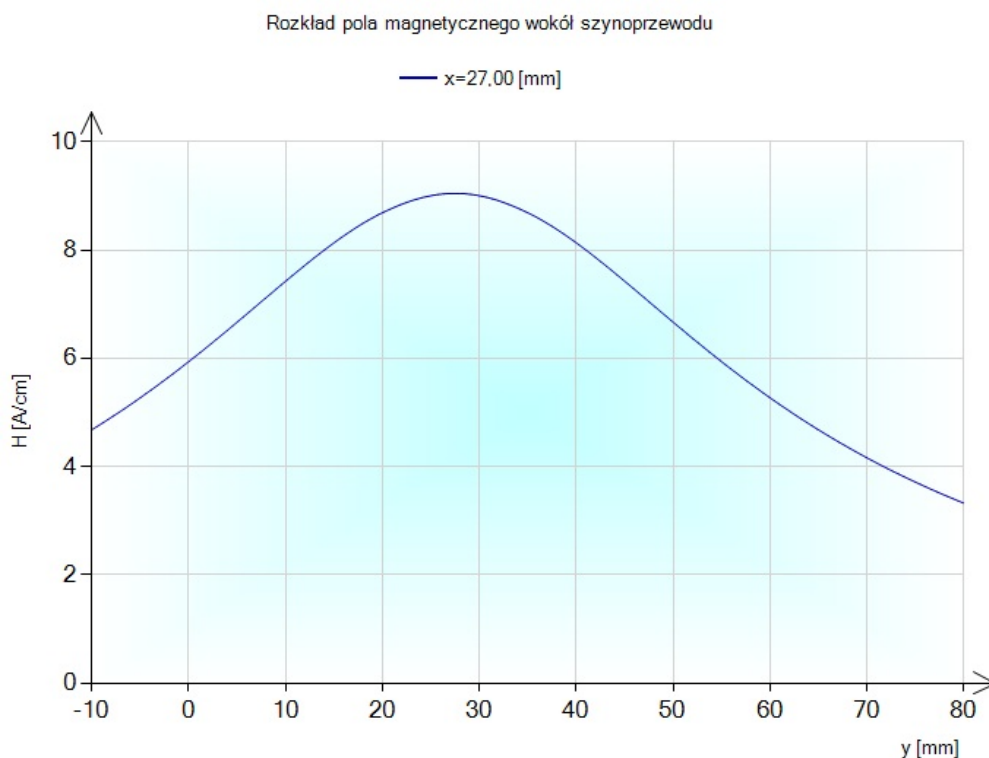
Rys. 14. Rozkład natężenia pola magnetycznego ekranowanego szynoprzewodu typu MR 250 dla $y = \text{var}$ oraz różnych wartości $x = \text{const.}$ w przypadku symetrii prądowej z prądem $I = 250$ A



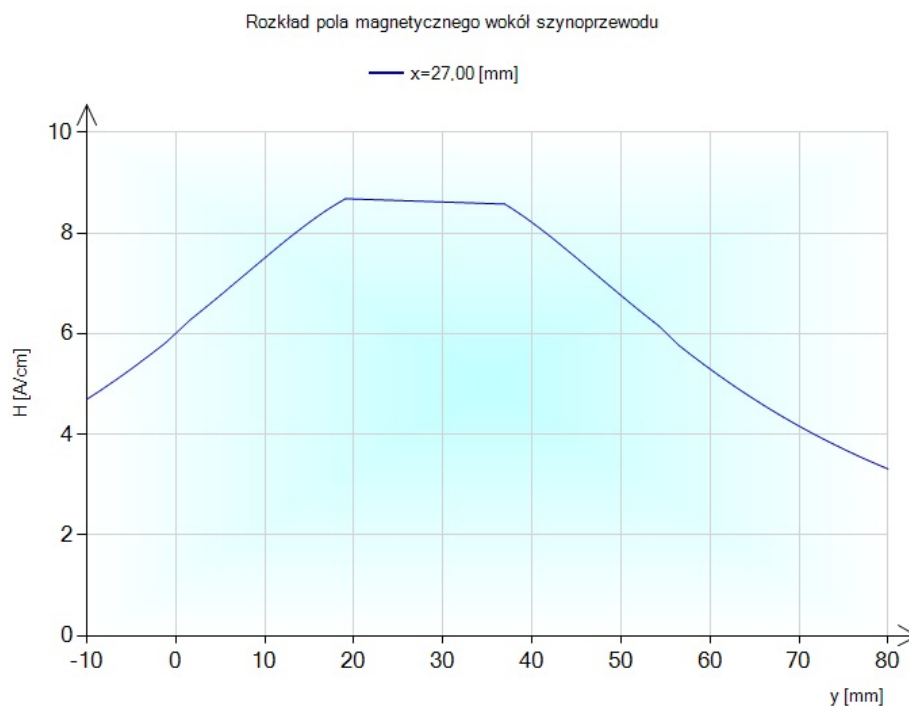
Rys. 15. Rozkład natężenia pola magnetycznego nieekranowanego szynoprzewodu typu MR 250 dla $x = \text{var}$ oraz różnych wartości $y = \text{const.}$ w przypadku symetrii prądowej z prądem $I = 250$ A



Rys. 16. Rozkład natężenia pola magnetycznego ekranowanego szynoprzewodu typu MR 250 dla $x = \text{var}$ oraz wybranej wartości $y = \text{const.}$ w przypadku symetrii prądowej z prądem $I = 250$ A



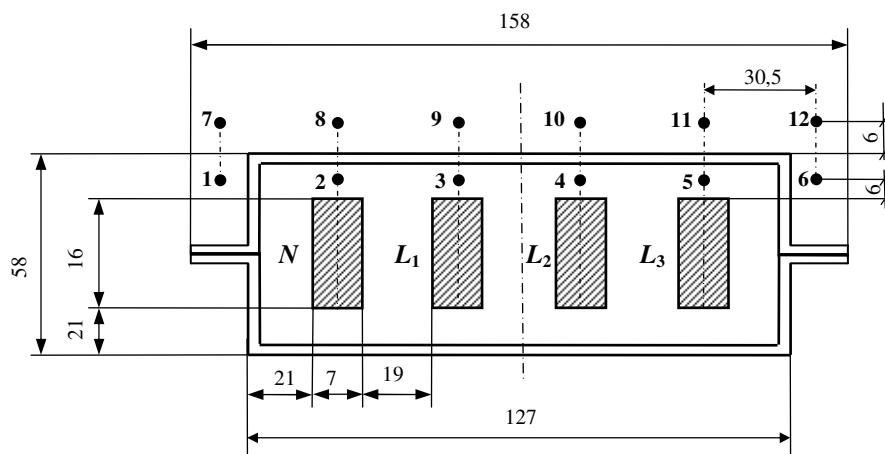
Rys. 17. Rozkład natężenia pola magnetycznego nieekranowanego szynoprzewodu typu MR 250 dla $y = \text{var}$ oraz wybranej wartości $x = \text{const.}$ w przypadku symetrii prądowej z prądem $I = 250$ A



Rys. 18. Rozkład natężenia pola magnetycznego ekranowanego szynoprzewodu typu HONR dla $y = \text{var}$ oraz wybranej wartości $x = \text{const.}$ w przypadku symetrii prądowej z prądem $I = 250$ A

Otrzymane rozkłady natężenia pola magnetycznego porównano ze sobą oraz z rezultatami otrzymanymi z zastosowaniem metody analitycznej (**AM**), równań całkowych (**IEM**), elementów skończonych (**FEM**) i wynikami pomiarów (**MM**).

Położenie punktów pomiarowych ilustruje rysunek 19, a wyniki przedstawiono w Tabeli 3.



Rys. 19. Położenie punktów pomiarowych ekranowanego szynoprzewodu typu MR

Tabela 3. Natężenie pola magnetycznego w wybranych punktach nieekranowanego (*) i ekranowanego (**) trójfazowego szynoprzewodu typu MR przy symetrii prądowej

Natężenie pola magnetycznego w kA/m przy symetrii prądowej o $I = 250$ A													
** *	Metoda	Punkty											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
*	AM	0.314	0.972	3.077	3.068	2.782	0.450	0.252	0.547	0.917	0.995	0.715	0.530
	IEM	0.280	0.800	2.850	3.150	2.950	0.600	0.250	0.520	1.000	1.150	0.850	0.420
	FEM	0.400	1.096	4.058	4.478	4.067	0.916	0.339	0.697	1.244	1.483	1.248	0.619
	MM	0.244	0.852	3.301	3.442	3.126	0.591	0.225	0.565	1.035	1.218	0.957	0.443
**	IEM	0.250	0.650	2.850	2.450	2.850	0.550	0.210	0.550	1.000	1.000	0.850	0.400
	FEM	0.368	1.141	4.024	4.437	4.101	0.917	0.312	0.651	1.163	1.439	1.263	0.618
	MM	0.203	0.521	2.975	4.353	3.390	0.278	0.162	0.142	0.150	0.190	0.204	0.197

* - bez obudowy; ** - z obudową

W wyniku przeprowadzonych obliczeń oraz badań eksperymentalnych stwierdzono znaczący wpływ osłony toru wieloprądowego na rozkład pola magnetycznego w otoczeniu szynoprzewodów oraz w obszarze zewnętrznym osłon. Zaprojektowane i wykonane stanowisko badawcze umożliwiło weryfikację eksperymentalną pola magnetycznego w nieekranowanym i ekranowanym szynoprzewodzie prostokątnym (w tym przypadku MR 250). 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.

4.8. Podsumowanie

Spadek napięcia na jednostkę długości w dowolnej szynie układu szynoprzewodów wyraża się równaniem całkowym. Równanie to uwzględnia nierównomierny rozkład gęstości prądu spowodowany zjawiskami naskórkowości i zbliżenia. Równanie to jest podstawą do zdefiniowania impedancji własnych i wzajemnych szynoprzewodów, a konsekwencji impedancji fazowych. W przypadku założonej stałej gęstości prądu w szynoprzewodach, definicje te umożliwiają wyznaczenie powyższych impedancji w postaci wzorów analitycznych. Wzory te uwzględniają wymiary poprzeczne i skończoną długość szynoprzewodów oraz odległości wzajemne szyn w układach szynoprzewodu [1,4,10,11,13].

W przypadku stałej gęstości prądu w szynoprzewodach indukcyjności własne i wzajemne szynoprzewodów wyrażają się poprzez całki sześciokrotne. Opracowana procedura wyznaczania tych całek umożliwia przedstawienie indukcyjności własnych i wzajemnych szynoprzewodów o przekroju prostokątnym i skończonej w postaci wzorów analitycznych, tzn. indukcyjności te są wyrażone poprzez funkcje standardowe. Wzajemne położenie szynoprzewodów może być przy tym dowolne [12-15].

Ogólne wzory na indukcyjności własne i wzajemne szynoprzewodów prostokątnych o skończonej długości umożliwiają także wyprowadzenie wzorów na te indukcyjności dla przypadków szczególnych szynoprzewodów, a mianowicie szynoprzewodów o małych wymiarach poprzecznych w stosunku do ich długości oraz długich i o skończonej długości szynoprzewodów taśmowych [2]. W tym ostatnim przypadku szynoprzewodów indukcyjności wzajemne wyrażone są wzorami analitycznymi dla szynoprzewodów taśmowych o równoległych jak również prostopadłych płaszczyznach [2].

Pole magnetyczne generowane przez prąd w szynoprzewodzie prostokątnym o skończonych wymiarach poprzecznych i skończonej długości może być opisane wzorami analitycznymi. Wzory te opisują pole magnetyczne w obszarze wewnętrznym szynoprzewodu jak również w jego obszarze zewnętrznym. W przypadku punktów leżących na granicy tych obszarów, pole magnetyczne wyznacza się z oddzielnych wzorów jako funkcje graniczne wzorów poprzednich.

Z powyższych wzorów ogólnych można wyprowadzić wzory opisujące pole magnetyczne w przypadkach szczególnych szynoprzewodu, a mianowicie dla

przypadku długich szynoprzewodów i skończonych wymiarów poprzecznych oraz dla przewodów taśmowych o skończonej długości jak również o długości znacznie większej niż wymiar poprzeczny szynoprzewodu taśmowego [1,2,8,9].

Wszystkie powyższe wzory umożliwiają obliczanie pola magnetycznego w dowolnym punkcie układów szynoprzewodów, w tym układów trójfazowych, przy symetrii jak również asymetrii prądowej.

W przypadku ekranowanych torów wielkoprądowych wyznaczanie impedancji własnych i wzajemnych jak również pola magnetycznego w szynach i ich otoczeniu jest możliwe tylko opracowaną metodą analityczno-numeryczną. Istota tej metody polega na podziale każdej szyny na prostokątne szyny elementarne i podziale osłony toru na prostokątne obszary elementarne o skończonej długości [1,4,11]. Dla tak dokonanej dyskretyzacji obszarów przewodzących wykorzystuje się wcześniej opracowane wzory na indukcyjności własne i wzajemne szyn prostokątnych. W ten sposób tworzy się całkowitą macierz impedancji, z której wyznacza się impedancje własne i wzajemne poszczególnej szyny, a konsekwencji własne wzajemne impedancje fazowe [12,15].

Opracowana metoda analityczno-numeryczna wyznaczania impedancji, rozkładu gęstości prądów i pola magnetycznego może być stosowana dla toru wielkoprądowego o dowolnej liczbie szyn na fazę, z szyną i bez szyny neutralnej, pionowym lub poziomym ustawieniem szyn, z izolowanym ekranem lub bez ekranu oraz z ekranem ze zwartymi końcami poprzez pewną rezystancję (np. przypadek dwustronnego uziemienia ekranu).

Ze względu na to, że kształty obudów produkowanych torów wielkoprądowych odbiegają od kształtu idealnego prostokąta konieczna jest weryfikacja eksperymentalna obliczonych wartości impedancji własnych i wzajemnych oraz pola magnetycznego. Taka weryfikacja jest możliwa dzięki wykorzystaniu trójfazowego wymuszalnika prądowego (rysunek 5).

Pomiar impedancji jest możliwy tylko do tzw. zredukowanych impedancji fazowych, czyli impedancji w odniesieniu do jednej z faz lub szyny neutralnej toru wielkoprądowego [1,4,11].

Zaprojektowane i wykonane stanowisko badawcze umożliwiło weryfikację eksperymentalną obliczonych wartości impedancji fazowych i pola magnetycznego wybranych trzech, produkowanych w kraju, układów torów wielkoprądowych o szynoprzewodach prostokątnych. Uzyskano zadawalającą zgodność z wartościami obliczonymi z wyprowadzonych wzorów analitycznych, analityczno numerycznych jak również oprogramowania bazującego na dwuwymiarowej metodzie elementów skończonych [30].

W wyniku przeprowadzonych obliczeń oraz badań eksperymentalnych stwierdzono znaczący wpływ osłony toru wieloprądowego na impedancje fazowe toru jak również na rozkład pola magnetycznego w otoczeniu szynoprzewodów oraz w obszarze zewnętrznym osłon [1,4,11].

Wyprowadzone wzory i przeprowadzone badania mogą być wykorzystane w stosowanych konstrukcjach ekranowanych i nieekranowanych torów wieloprądowych w celu wyznaczania: rozptyłu prądów w układach szynoprzewodów, spadków napięć w przewodach fazowych szynoprzewodów, obciążalności prądem długotrwałym, minimalnych wymiarów szynoprzewodu dla zadanego prądu (zagadnienie odwrotne do poprzedniego), oddziaływań elektrodynamicznych w torach prądowych w stanach zwarciovych (przy zwarciach), cieplnego działania prądu zwarciovego, dynamicznego działania prądu zwarciovego (wskutek oddziaływania zarówno prądów różnych faz jak i prądów w poszczególnych płaskownikach tej samej fazy), strat cieplnych w torach prądowych, strat mocy w ekranach (osłonach, obudowach metalowych) torów prądowych.

Przeanalizowano również kilka trójfazowych torów prądowych z dwoma prostokątnymi szynoprzewodami na fazę pod kątem rozdziału prądów między szynoprzewody oraz strat mocy w nich. Badano wpływ kształtu i ułożenia szynoprzewodów. Rozpatrywano tory nieekranowane, jak i trzy rodzaje ekranowania [3]. Wyniki analizy mogą być pomocne w projektowaniu torów prądowych.

4.9. Literatura

a) literatura wchodząca w cykl osiągnięcia naukowego

1. **Kusiak D.**: The Magnetic Field and Impedances in Three-Phase Rectangular Busbars with a Finite Length, *Energies*, **2019**, 12, pp. 20; doi:10.3390/en12081419
2. **Kusiak D.**, Piątek Z., Szczegielniak T.: Magnetic Field of a Ribbon Busbar of Finite Length, *ITM Web of Conferences*, Vol.19, 01010, **2018**; doi.org/10.1051/itmconf/20181901010
3. Jabłoński P., **Kusiak D.**, Piątek Z., Szczegielniak T.: The effect of busbar shape and arrangement on currents and power losses in 3-phase busducts with two busbars per phase, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.94, nr 1, s. 41-44, **2018**
4. **Kusiak D.**, Szczegielniak T.: Obliczenia elektromagnetyczne szynoprzewodów, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, seria *Monografie nr 326*, 177s., Częstochowa, **2017**
5. Szczegielniak T., Piątek Z., Baron B., Jabłoński P., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: A Discrete Numerical Method for Magnetic Field Determination in Three-Phase Busbars of a Rectangular Cross-Section, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, Vol. 24, s. 1279-1291, **2016**
6. Jabłoński P., **Kusiak D.**, Szczegielniak T., Piątek Z.: Reduction of Impedance Matrices of Power Busducts, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.92, nr 12, s. 49-52, **2016**

7. **Kusiak D.**, Piątek Z., Szczegielniak T., Jabłoński P.: Calculations of the Magnetic Field of the Three-Phase 4-Conductor Line with Rectangular Busbars, *Computer Applications in Electrical Engineering*, Vol.14, s. 25-38, **2016**
8. **Kusiak D.**, Piątek Z., Szczegielniak T., Jabłoński P.: Wyznaczanie pola magnetycznego w nieekranowanym trójfazowym czteroprzewodowym torze wielkopiętrowym o szynach prostokątnych, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, Iss.81, ISSN 1897-0737 s.55-62, **2015**
9. Piątek Z., Baron B., Jabłoński P., Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: A numerical-analytical method for magnetic field determination in three-phase busbars of rectangular cross section, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 91, nr 12, s. 193-197, **2015**
10. Szczegielniak T., Piątek Z., **Kusiak D.**: Impedancje własne i wzajemne szynoprzewodów prostokątnych o skończonej długości, *Informatyka Automatyka Pomiary w Gospodarce i Ochronie Środowiska (IAPGOŚ)*, ISSN 2083-0157, Nr 4, s. 21-24, **2014**
11. 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 (PIER)*, B, Vol.51, s. 135-156, **2013**
12. Piątek Z., Baron B., Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: Exact closed form formula for mutual inductance of conductors of rectangular cross section, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, nr 3a, s. 61-64, **2013**
13. Baron B., Piątek Z., Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: Impedance of an isolated rectangular conductor, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, nr 4, s. 278-280, **2013**
14. Piątek Z., Baron B., Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: Inductance of a long two-rectangular busbar single-phase line, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, nr 6, s. 290-292, **2013**
15. Piątek Z., Baron B., Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: Mutual inductance of long rectangular conductors, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88, nr 9a, s. 175-177, **2012**

b) literatura uzupełniająca

16. Bednarek K., Nawrowski R., Tomczewski A.: Analiza rozkładu pola elektrycznego w optymalizacji trójfazowych torów wielkopiętrowych pracujących w układzie płaskim. *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 82, Nr 12, **2006**, ss. 49-52
17. Koch H.: *Gas-Insulated Transmission Lines*, John Wiley&Sons, **2012**
18. Nawrowski R.: *Tory wielkopiętrowe izolowane powietrzem lub SF₆*. Wyd. Pol. Poznańskiej, Poznań **1998**
19. 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.
20. Sarajcev P.: Numerical Analysis of the magnetic field of High-Current Busduct and GIL Systems. *Energies*, **2011**, 4, s. 2196-2211.
21. HOLDUCT *Systemy szynoprzewodów*. [Online]. Available: <http://www.holduct.com.pl> (18.04.2019)
22. https://www.se.com/pl/pl/download/document/CANALIS_20_1000A_cat/ (18.04.2019)
23. Piątek Z.: *Impedances of high-current busducts*. Wyd. Pol. Częst., Częstochowa **2008**
24. Piątek Z.: *Modelowanie linii, kabli i torów wielkopiętrowych*. Wyd. Pol. Częst., Częstochowa **2007**
25. Piątek Z., **Kusiak D.**, Szczegielniak T.: Eliptyczne pole magnetyczne w torach wielkopiętrowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86, Nr 4, **2010**, ss. 101-106
26. PN-EN 62311:2008 *Ocena urządzeń elektronicznych i elektrycznych w odniesieniu do ograniczeń ekspozycji ludności w polach elektromagnetycznych (0 Hz-300 GHz)*.
27. PN-T-06580:2002 *Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz*. Arkusz 01. Terminologia. Arkusz 03. Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy.

28. Baron B., Piątek Z.: Gęstości prądów i impedancje płaskiego toru wieloprądowego złożonego z ceowników. ZKwE'98, Poznań/Kiekrz, 20-22 kwietnia 1998, ss. 139-144
29. Kolańska-Pluska J., Jabłoński P., Piątek Z.: Numerical method of computing the impedance of a twin high current busduct of rectangular hollow conductors, *Progress in Electromagnetics Research (PIER)*, M, Vol.34, s. 9-17, 2014
30. FEMM (Finite Element Method Magnetics) www.femm.info (18.04.2019)
31. Kolimas Ł.: *Modelowanie urządzeń elektrofizycznych z wykorzystaniem oprogramowania MES*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016
32. **Kusiak D.**: Description of elliptic magnetic field in unshielded bifilar transmission line, *Electrical Engineering*, Iss.62, s.67-76, 2010

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Do pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych, niewchodzących w skład osiągnięcia wymienionego w punkcie 4b zestawu publikacji, autor wniosku zalicza publikacje związane z tematyką torów wieloprądowych i szynoprzewodów. Należy do nich kilka wybranych pozycji z 70 wykazanych w załączniku 4 jako nie wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

- I. **Kusiak D.**, Szczegielniak T., Piątek Z.: Asymetria pola magnetycznego ekranowanego trójfazowego jednobiegunowego płaskiego toru wieloprądowego, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, Iss.93, s. 29-38, 2019
- II. **Kusiak D.**: Znaczenie wpływu odległości między przewodami na pole magnetyczne trójfazowego jednobiegunowego ekranowanego płaskiego toru wieloprądowego, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, Iss.93, s. 109-120, 2018
- III. **Kusiak D.**, Szczegielniak T., Piątek Z.: Wizualizacja pola magnetycznego przewodu taśmowego o skończonej długości, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, Iss.93, s. 109-120, 2018
- IV. **Kusiak D.**, Szczegielniak T., Jabłoński P., Piątek Z.: An Improved Solution for the Skin and Proximity Effects in a Tubular Screen, 19th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2018, IEEE Xplore Digital Library.
- V. Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Jabłoński P., Piątek Z.: Analytical-numerical solution for the proximity effect in a tubular screen, 19th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2018, IEEE Xplore Digital Library.
- VI. **Kusiak D.**, Piątek Z., Szczegielniak T.: The asymmetry of the magnetic field distribution in a flat unshielded 3-phase high current busduct, *Acta Technica Jaurinensis*, Vol. 6, nr 1, s. 49-55, 2013

- VII. 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
- VIII. Piątek Z., Baron B., Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: Mutual inductance of two thin tapes with parallel widths, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, nr 4, s. 281-283, **2013**
- IX. Piątek Z., Baron B., Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Pasierbek A.: Mutual inductance of two thin tapes with perpendicular widths, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 89, nr 6, s. 287-289, **2013**
- X. Szczegielniak T., **Kusiak D.**, Jabłoński P., Piątek Z.: Power losses in a three-phase single-pole gas-insulated transmission line (GIL), *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, Vol. 8, N. 5, **2013**
- XI. **Kusiak D.**, Piątek Z., Szczegielniak T.: Illustration of the elliptical field in the screened flat 3-phase high current busduct, *Computer Applications in Electrical Engineering*, Publishing House of Poznan University of Technology, Vol. 10, Edited by Ryszard Nawrowski, s. 80-97, **2012**
- XII. **Kusiak D.**, Piątek Z., Szczegielniak T.: Magnetic field in the monophas single-pole bifilar high-current busduct, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 88, nr 3a, s. 64-66, **2012**
- XIII. **Kusiak D.**, Piątek Z., Szczegielniak T.: Grubość ekranu i jego wpływ na całkowite pole magnetyczne ekranowanego rurowego trójfazowego symetrycznego toru wielkoprowadowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.88, nr 12b, s. 68-70, **2012**
- XIV. **Kusiak D.**, Piątek Z., Szczegielniak T.: Wpływ odległości między przewodami a ekranem na pole magnetyczne ekranowanego dwuprzewodowego bifilarnego toru wielkoprowadowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 87, nr 12b, **2011**, s. 147-149, **IF(2011) = 0,244**
- XV. Piątek Z., **Kusiak D.**, Szczegielniak T.: The impact of the displacement of the both the tubular conductor and screen axes on the magnetic field in high current busducts, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 87, nr 5, **2011**, s. 126-129, **IF(2011) = 0,244**
- XVI. Piątek Z., Szczegielniak T., **Kusiak D.**: Power losses in the screen of bifilar high current busduct, *Przegląd Elektrotechniczny*, R.87 nr 5, s. 130-133, **2011**, **IF(2011) = 0,244**
- XVII. Piątek Z., **Kusiak D.**, Szczegielniak T.: Eliptyczne pole magnetyczne w torach wielkoprowadowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86, Nr 4, ss. 101-106, **2010**, **IF(2010) = 0,242**

- XVIII. Piątek Z., **Kusiak D.**, Szczegielniak T.: Influence of the screen on the magnetic field of the flat three phase high current busduct, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 86 nr 1, ss. 89-91, **2010**, **IF(2010) = 0,242**
- XIX. Piątek Z., **Kusiak D.**, Szczegielniak T.: Influence of eddy currents on the magnetic field of the flat three phase high current busduct, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 85, Nr 7, s. 36-39, **2009**, **IF(2009) = 0,196**
- XX. Piątek Z., **Kusiak D.**, Szczegielniak T.: Pole magnetyczne przewodu ekranowanego, *Przegląd Elektrotechniczny*, R85, Nr 5, s.92-95, **2009**, **IF(2009) = 0,196**

Kilka powyższych prac dotyczy tematyki związanej z cyklem publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego. Odnoszą się one do wyznaczania pola magnetycznego [III, VII] oraz impedancji [VIII, IX] w szynoprzewodach prostokątnych.

W innych pracach opisano m.in. pole magnetyczne rurowych torów wielkoprądowych, ogólną analizę i wizualizację modułów i argumentów tego pola w postaci wykresów jako funkcji zmiennych względnych [XII, XX]. Pole magnetyczne w otoczeniu osłoniętych torów wielkoprądowych jest sumą wektorową pola magnetycznego generowanego przez prądy fazowe i przez prądy powrotne w osłonach oraz pola magnetycznego oddziaływania zwrotnego wytworzonego przez indukowane prądy wirowe [XIX].

Pole magnetyczne oddziaływania zwrotnego znacząco redukuje natężenie pola magnetycznego na powierzchni zewnętrznej ekranu nawet już przy małych wartościach współczynnika α . Należy przy tym zauważyć, że w przypadku punktów najbliższych położonych faz skrajnych zmiany pola magnetycznego nie są symetryczne [I, VI]. W ekranie na wewnętrzne zjawisko zbliżenia nakłada się zjawisko naskórkowości i tam pole magnetyczne w pewnych punktach wzrasta, w innych zaś maleje [IV, V, XVIII]. Wielkość tych zmian zależy od współczynników λ oraz α , a więc od konduktywności ekranu i jego wymiarów poprzecznych, częstotliwości prądu w przewodzie fazowym oraz wzajemnej konfiguracji geometrycznej między tym przewodem a ekranem [II, XIII, XIV, XV]. Harmoniczne pole magnetyczne w osłoniętych torach wielkoprądowych jest wirującym polem eliptycznym [XI, XVII]. Straty mocy w przewodach fazowych jak i osłonach torów wielkoprądowych mogą być wyznaczone metodami analitycznymi [X, XVI].

Udział w tych pracach jest równo podzielony na wszystkich autorów publikacji.

6. Podsumowanie osiągniętych wyników

Publikacje dotyczą analitycznego, numerycznego i eksperymentalnego wyznaczania impedancji oraz pola magnetycznego wybranych torów wieloprądowych. Zostały opisane metody obliczeń impedancji przewodów szynowych o skończonej długości oraz zasady wyznaczania impedancji własnej przewodu rurowego o skończonej długości. Prace obejmują także analizę porównawczą wyników obliczeń z wynikami pomiarów.

Wyznaczone pole magnetyczne w przewodach i ekranach osłoniętych i nieosłoniętych szynoprzewodów umożliwia wyznaczenie rozkładów gęstości prądów indukowanych i całkowitych z uwzględnieniem zjawisk naskórkowości i zbliżenia. To z kolei pozwala na określenie strat mocy czynnej i rozkładów temperatur w tych elementach toru wieloprądowego. Wtedy też możliwe jest wyznaczenie sił elektrodynamicznych występujących między przewodami fazowymi oraz między przewodami a ekranem. W konsekwencji jest możliwa optymalizacja energetyczno- materiałowa osłoniętych torów wieloprądowych.

Metody numeryczne wykorzystane są tutaj do wyznaczania parametrów elektromagnetycznych w torach wieloprądowych w różnych układach geometrycznych. Jednak jeśli jest to możliwe, w swoich publikacjach autor proponuje również analityczne metody wyznaczania tych parametrów.

Dotychczasowy dorobek publikacyjny autora wniosku obejmuje ponad 150 publikacji, a po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych 140 publikacji (w tym 7 publikacji samodzielnych i 38 publikacji gdzie jest autorem na widniejącym na pierwszym miejscu). Tytuły prac dostępne na stronie <http://www.bg.pcz.pl/apisnb/> po wpisaniu w wyszukiwarce nazwiska autora. W czasopiśmie z listy Journal Citation Report zostało opublikowanych 9 prac (wszystkie po doktoracie), w tym 1 samodzielna i 1, w której autor jest na pierwszej pozycji. 61 prac zostało opublikowanych w recenzowanych, renomowanych czasopiśmie takich jak: International Review of Electrical Engineering, Progress in Electromagnetics Research (PIER) B, Przegląd Elektrotechniczny, Wiadomości Elektrotechniczne, Prace Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering, Computer Applications in Electrical Engineering, Acta Technica CSAV, Acta Technica Jaurinensis, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej. Elektryka. Pozostałe prace ukazały się w recenzowanych materiałach międzynarodowych i krajowych konferencji, takich jak: Seminarium Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów (IC-SPETO), Zastosowania Komputerów w Elektrotechnice (ZKwE), Computational Problems in Electrical Engineering

(CPEE), Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering (AMTEE), International Symposium „Modern Electric Power Systems” (MEPS), Sympozjum Środowiskowe PTZE „Zastosowania Elektromagnetyzmu w Nowoczesnych Technikach i Medycynie”, Seminarium Naukowe „Wybrane Zagadnienia Elektrotechniki i Elektroniki” (WZEE), Sympozjum Pomiarów Magnetycznych (SPM), Krajowa Konferencja „Modelowanie i Symulacja” (MiS), jak również jako rozdziały w monografiach. Prace stanowiące dorobek naukowy autora zostały zamieszczone w czasopismach o cyrkulacji krajowej i międzynarodowej, czego efektem są ich liczne cytowania.

Baza **Web of Science** Core Collection indeksuje **18** publikacji, które są cytowane **23** razy (w tym **17** bez autocytowań). **Index Hirscha** jest równy **2**.

Baza **Scopus** indeksuje **32** publikacje, które są cytowane **75** razy (w tym **30** bez autocytowań). **Index Hirscha** jest równy **3**.

Sumaryczny Impact Factor (IF) dla publikacji w czasopismach z listy JCR zgodnie z rokiem opublikowania wynosi **4,862**. Wartość współczynnika IF z uwzględnieniem udziału procentowego autora w publikacjach wynosi **3,293**.

Sumaryczna liczba przyznawanych punktów na rok publikacji określonych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego wynosi **595,8 (201,4** z uwzględnieniem udziału procentowego autora).

Aktywność autora wniosku w środowisku naukowym przejawia się między innymi czynnym uczestnictwem w międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych, a także działalnością w ramach Polskiego Towarzystwa Elektrotechniki Teoretycznej i Stosowanej (PTETiS).

Autor wniosku wykonał recenzje 18 artykułów, w tym:

8 artykułów dla czasopism z listy JCR: Energies

2 artykułów dla czasopism krajowych: Przegląd Elektrotechniczny, Archives of Electrical Engineering

8 artykułów konferencyjnych: Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Międzynarodowa Sesja Studencka „Innovation in production processes, technology and safety”.

W roku 2011 autor wniosku odbył staż naukowo-badawczy w firmie Holduct Sp. z o.o. z siedzibą w Mysłowicach, która specjalizuje się w produkcji szynoprzewodów (sfinalizowany w ramach projektu „Politechnika Częstochowska otwarta dla innowacyjnej gospodarki regionu” przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego).

Zaangażowanie autora w tematykę związaną z torami wielkopiętrowymi poparte jest także udziałem w grantach oraz projektach wykonywanych na rzecz

przemysłu. Autor wniosku uczestniczył w projekcie NN511312540 pt. „Konstrukcja metod analityczno-numerycznych do badania pola elektromagnetycznego oraz impedancji trójfazowych układów szynoprzewodów prostokątnych o skończonej długości”, w którym odpowiedzialny był za przeprowadzenie pomiarów oraz przygotowanie stanowiska pomiarowego a także wykonywanie obliczeń numerycznych. Uczestniczył również w projekcie POIR.01.01.01-00-0589/16 pt. „Szynoprzewód w izolacji stałej o własności kompensacji mocy biernej” prowadzonym przez firmę Holduct Sp. z o. o. w Mysłowicach. Odpowiedzialny był tam za wykonanie obliczeń numerycznych i pomiar pola magnetycznego wokół badanego szynoprzewodu.

Poza działalnością naukową autor wniosku prowadzi aktywną działalność dydaktyczną i organizacyjną na rzecz macierzystego Wydziału i Uczelni. Autor wniosku jest promotorem ponad 50 prac inżynierskich i magisterskich, a od roku 2014 pełni funkcję opiekuna praktyk studenckich ds. studiów niestacjonarnych. Jest też promotorem pomocniczym w rozprawie doktorskiej nt. „Optymalizacji rozkładu przestrzennego wielowiązkowych linii kablowych w celu minimalizacji strat energii”. W ramach pracy organizacyjnej autor wniosku był między innymi członkiem Komisji Kasacyjnej ds. Środków Trwałych na WE oraz członkiem Wydziałowego Zespołu ds. Ankietyzacji. Był również sekretarzem Komisji Rekrutacyjnej Wydziału Elektrycznego, a także układał plan dla pracowników WE. Od 2017 roku jest koordynatorem PRK (Polska Rama Kwalifikacji) dla kierunku Elektrotechnika, a od lutego 2019 roku jest kierownikiem Zakładu Elektrotechniki na Wydziale Elektrycznym. W 2018 brał udział w Komisji przygotowującej raport samooceny kierunku Elektrotechnika dla Państwowej Komisji Akredytacyjnej i kierunek Elektrotechnika uzyskał pozytywną ocenę. Autor brał także udział w różnych Promocjach PCz i Wydziału Elektrycznego (np. Festiwalach Nauki, Industraidzie, Pikniku Naukowym, Dni Otwartych Drzwi, itp.).

Zaangażowanie autora wniosku w pracę naukową, dydaktyczną i organizacyjną zostało wyróżnione 6 zespołowymi nagrodami Rektora Politechniki Częstochowskiej.

Zestawienie osiągnięć naukowych autora wniosku (po uzyskaniu stopnia doktora)			Razem	
Opublikowane prace naukowe			140	
Czasopisma	z listy JCR	9		
	międzynarodowe	4		
	krajowe	57		
Materiały konferencyjne	międzynarodowe	30		
	krajowe	34		
Rozdziały w książkach lub monografiach		5		
Monografia współautorska		1		
Sumaryczny Impact Factor według listy JCR (IF dla zgłoszonego cyklu publikacji)				4,862 (3,254)
Liczba publikacji indeksowanych przez bazę WoS				18
Liczba cytowań publikacji według bazy WoS (bez autocytowań)			23 (17)	
Liczba publikacji indeksowanych przez bazę Scopus			32	
Liczba cytowań publikacji według bazy Scopus (bez autocytowań)			75 (30)	
Indeks Hirscha według bazy Web of Science			2	
Indeks Hirscha według bazy Scopus			3	
Kierowanie lub udział w projektach badawczych	międzynarodowe	-	1	
	krajowe	1		
Udział w konferencjach naukowych	międzynarodowe	9	46	
	krajowe	37		
Udział w komitetach organizacyjnych konferencji	międzynarodowe	-	1	
	krajowe	1		
Uczestnictwo w programach europejskich			1	
Członkostwo w towarzystwach naukowych			1	
Wykonane ekspertyzy lub inne opracowania na zamówienie			1	
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych			-	
Recenzowanie artykułów dla czasopism	z listy JCR	8	10	
	krajowe	2		
Recenzowanie artykułów konferencyjnych	międzynarodowe	5	8	
	krajowe	3		
Nagrody za działalność naukową	indywidualne	-	5	
	zespołowe	5		
Nagrody za działalność organizacyjną	indywidualne	0	1	
	zespołowe	1		

Dariusz Kusiak

dr inż. Dariusz Kusiak

Dariusz Kusiak