



**Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie**



Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki
Katedra Elektroniki

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**Wytwarzanie i sterowanie polami
magnetycznymi dla radiowej identyfikacji
obiektów RFID oraz indukcyjnego
przekazu energii**

MGR INŻ. MARCIN SZCZURKOWSKI

Promotor:

Prof. dr hab. Lidia J. Maksymowicz

Akademia Górniczo-Hutnicza
Katedra Elektroniki

KRAKÓW 2010

1. WSTĘP

Systemy automatycznej identyfikacji RFID są obecnie w fazie dynamicznego rozwoju. Poszerzający się zakres zastosowań i stale rosnące możliwości techniczne systemów RFID stają się inspiracją do podejmowania kolejnych zadań. Obecnie istotnym celem badań jest stworzenie możliwości użytkowania systemów RFID w bardzo trudnych warunkach środowiskowych. Wychodzi to naprzeciw stałej tendencji zmian w światowym górnictwie, w którym nieustannie rośnie stopień mechanizacji, automatyzacji i informatyzacji prac podziemnych. Mając na uwadze ograniczenie ilości wypadków dąży się do ograniczenia liczebności górników bezpośrednio zatrudnionych pod ziemią, kontroli rozmieszczenia i ruchu załóg górniczych, a także ewidencji usytuowania i stanu sprzętu w kopalniach. Metody automatycznej identyfikacji obiektów są zatem bardzo interesującym rozwiązaniem technologicznym, które może znaleźć szersze zastosowanie. Pierwsze wdrożenie technologii RFID do polskiego górnictwa dotyczy znakowania maszyn górniczych i zostało zrealizowane we współpracy czterech ośrodków (KOMAG, Politechnika Śląska, AGH, ELSTA). Autor prezentowanej pracy uczestniczył, w realizacji prac badawczych tego wdrożenia a uzyskane wyniki zostały w znacznej części wykorzystane do budowy podzespołów czytnika oraz transponderów w systemie RFID przeznaczonym do użytkowania w górnictwie.

2. CEL I TEZA PRACY

Podstawowym celem pracy jest określenie możliwości zastosowania badań modelowych pola elektromagnetycznego do optymalizacji konstrukcji obwodu antenowego w celu zapewnienia radiowej identyfikacji obiektów RFID usytuowanych w otoczeniu metalicznym oraz analiza zjawisk cieplnych indukowanych przez zewnętrzne pole magnetyczne w transponderach systemu RFID przeznaczonych do pracy w środowisku niebezpiecznym.

Pierwszym celem użytkowym jest opracowanie konstrukcji obwodu antenowego oraz elektronicznych obwodów detekcyjnych przeznaczonych do głowicy czytnika RFID w celu umożliwienia odczytu danych z transponderów RFID wbudowanych w metalowe części maszyn górniczych.

Drugim celem użytkowym jest praktyczna realizacja głowicy czytnika RFID i wybór odpowiedniego transpondera RFID do znakowania elementów maszyn górniczych oraz opracowanie procedury badawczej i cyklu projektowo-konstrukcyjnego zapewniającego bezpieczną eksploatację tych urządzeń w środowisku niebezpiecznym a także uzyskanie formalnego dopuszczenia do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem.

Tezy pracy zostały określone następująco:

Teza I:

Modelowanie pola elektromagnetycznego można wykorzystać do opracowania systemu zdalnej identyfikacji radiowej RFID eksploatowanego w trudnych warunkach środowiskowych (otoczenie metaliczne, zagrożenia środowiskowe).

Teza II:

Przeprowadzenie badań termicznego oddziaływania pola elektromagnetycznego na podzespoły RFID można wykorzystać do weryfikacji możliwości ich zastosowań w niebezpiecznych warunkach środowiskowych.

3. PRZECIWWYBUCHOWE URZĄDZENIA RFID W WYKONANIU ISKROBEZPIECZNYM

W skład typowego systemu RFID wchodzi układ antenowy i czytnik RFID oraz rozmieszczone na identyfikowanych obiektach transpondery. Adaptacja takiego systemu do podziemnych wyrobisk górniczych wymaga aby wszystkie jego elementy mogły pracować w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Transpondery są montowane trwale do identyfikowanego obiektu (np. do maszyny, lampy górniczej) i znajdują się ciągle, bądź przez długi okres czasu w przestrzeni zagrożonej wybuchem, natomiast czytnik RFID może pracować w trakcie odczytu zarówno w strefach niebezpiecznych, jak i poza nimi. Dlatego wszystkie elementy tego systemu powinny być w wykonaniu przeciwwybuchowym.

Obwód antenowy czytnika RFID wypromieniowuje energię elektromagnetyczną także w przestrzeni zagrożonej wybuchem, stwarzając możliwość wystąpienia co najmniej dwóch sytuacji zagrażających wybuchem. Pierwszą sytuacją jest możliwość powstania wybuchu poprzez wypromieniowanie przez obwód antenowy zbyt dużej gęstości energii, a drugą jest możliwość zapłonu termicznego na skutek nagrzania się transpondera w polu elektromagnetycznym czytnika. Dlatego w trakcie projektowania należy koniecznie uwzględnić oba te zdarzenia dostosowując wprowadzane funkcje bezpieczeństwa przeciwwybuchowego do poziomu bezpieczeństwa wymaganego przez miejsce pracy danego urządzenia. Opisane w pracy rozwiązania konstrukcyjne zapewniające osiągnięcie wymaganego stopnia ochrony budowy przeciwwybuchowej. Opracowano je na podstawie odpowiednich analiz oraz badań eksperymentalnych jak również wykorzystując autorski plan badawczy, wprowadzony już na etapie projektowania.

4. MODELOWANIE PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH

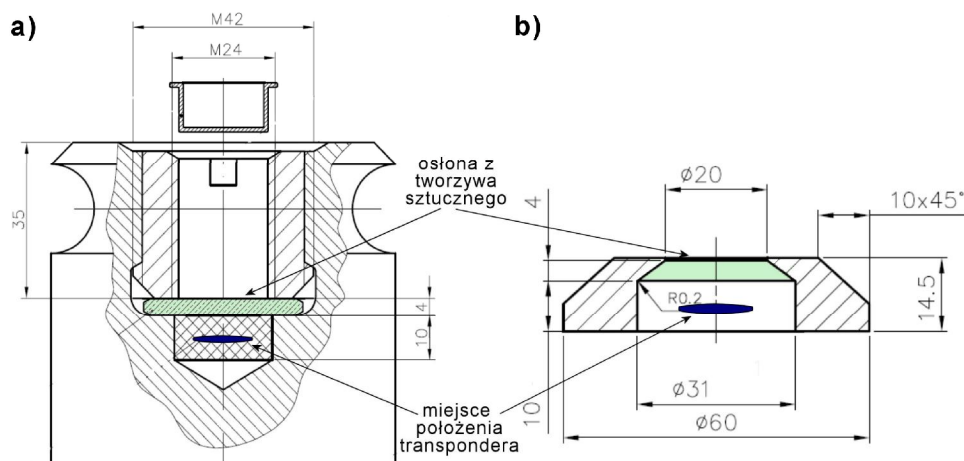
Rozwiązywanie problemów inżynierskich w sposób analityczny, w sytuacji gdy mamy do czynienia z skomplikowanymi kształtami, nieliniowością ośrodka oraz brakiem symetrii jest trudne, a w wielu przypadkach wręcz niemożliwe. Z tego powodu do rozwiązywania tego typu problemów sięga się po metody numeryczne. Celem przeprowadzonego modelowania geometrii układu antenowego czytnika RFID było umożliwienie odczytu danych z transponderów zanurzonych konstrukcyjnie w metalu przy użyciu wspomaganych komputerowo numerycznych metod do obliczania pól elektromagnetycznych.

Ze względu na konieczność rozwiązania dużej liczby równań algebraicznych jedną z podstawowych metod przeprowadzania komputerowo wspomaganych obliczeń inżynierskich jest metoda elementów skończonych. Metoda elementów skończonych (MES) pozwala na obliczenie wartości pola w założonych punktach jego obszaru, a otrzymany wynik stanowi przybliżenie wartości rzeczywistej. W metodzie tej obszar dla którego obliczane jest pole dzieli się na podobszary. W pracy wykorzystano do analizy rozkładu pola magnetycznego program komputerowy COMSOL Multiphysics, który służy do wykonywania złożonych obliczeń inżynierskich i symulacji fizycznych poprzez rozwiązywanie układów nieliniowych równań różniczkowych cząstkowych przy wykorzystaniu metody elementów skończonych (MES) w jednym, dwóch lub trzech wymiarach. Do modelowania magnetycznych układów antenowych czytnika RFID wykorzystano moduł AC/DC zawierający interfejs użytkownika umożliwiającą analizę efektów elektromagnetycznych.

4.1. Dobór układu antenowego czytnika RFID

Jednym z podstawowych celów pracy było uzyskanie odpowiedniej konstrukcji geometrycznej obwodu antenowego czytnika RFID, która zapewni jak największy zasięg odczytu transponderów zanurzonych konstrukcyjnie w metalu. Projektowana głowica odczytująca RFID powinna pracować w trudnych warunkach środowiskowych podziemi

kopalń, gdzie transpondery były zabudowywane w masywnych metalowych kształtkach montowanych do elementów maszyn górniczych (rys. 4.1). Dostępne komercyjnie obwody antenowe czytników RFID nie działają poprawnie w przypadku odczytu z transponderów zanurzonych konstrukcyjnie w metalu (rys. 4.1a), natomiast w przypadku transponderów montowanych na powierzchniach płaskich (rys. 4.1b) odczyt był możliwy, natomiast zasięgi odczytu były mniejsze w odniesieniu od zasięgów odczytu w powietrzu bez elementów metalicznych w pobliżu. W celu wybrania odpowiedniego układu antenowego czytnika RFID, przeprowadzono badania modelowe i eksperymentalne rozkładu pola elektromagnetycznego dla cewek powietrznych i cewek z rdzeniami ferromagnetycznymi przy uwzględnieniu otoczenia metalicznego.



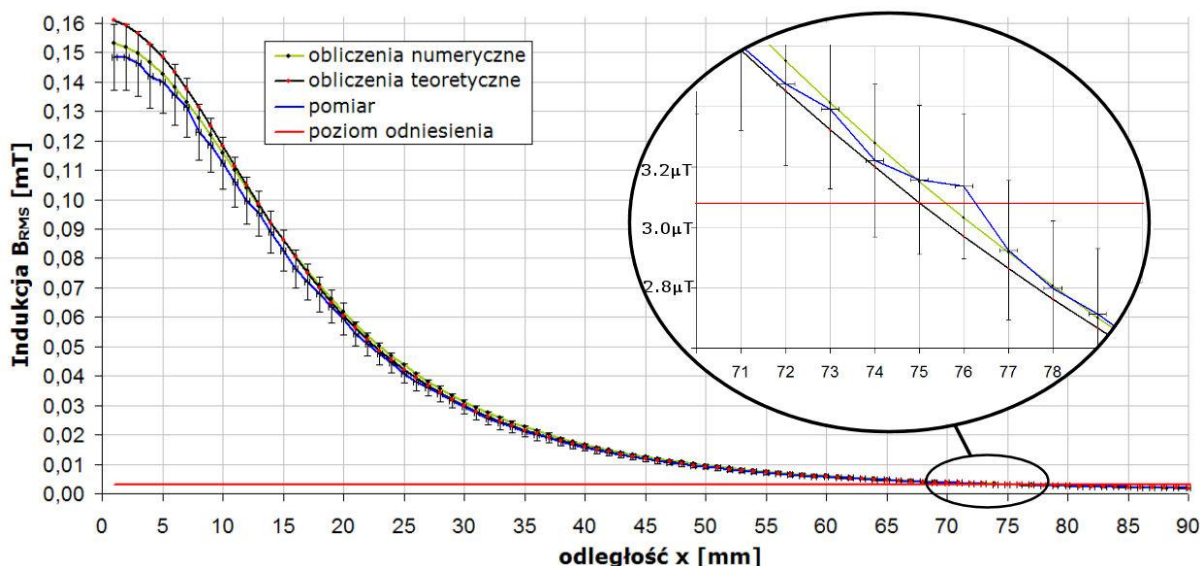
Rysunek 4.1. Dwa sposoby zabudowy transponderów w metalu; a) transponder wbudowany w metalowy element mechaniczny maszyny górniczej; b) transponder mocowany na powierzchni metalowego elementu mechanicznego maszyny górniczej.

Punktem wyjścia do rozważań możliwości wykorzystania modelowanego pola elektromagnetycznego do maksymalizacji zasięgu odczytu transpondera RFID w otoczeniu metalicznym była analiza rozkładu pola magnetycznego dla dwóch różnych cewek powietrznych. Badania podzielone zostały na następujące etapy:

- obliczenia analityczne i symulacje cewek powietrznych w celu wyznaczenia rozkładu pola magnetycznego w powietrzu,
- pomiary rozkładu pola magnetycznego przeprowadzone celem weryfikacji obliczeń analitycznych i numerycznych,
- pomiary minimalnego poziomu indukcji magnetycznej przy której możliwy jest odczyt numeru identyfikacyjnego na wybranej próbce transponderów,
- symulacje wpływu otoczenia metalicznego na pracę obwodu antenowego i zasięgi odczytu oraz,
- symulacje i pomiary rozkładu pola magnetycznego w otoczeniu metalicznym.

Pomiar rozkładu pola magnetycznego przeprowadzony został na specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku badawczym. Bazowa konstrukcja wyposażona została w poziomo ruchome ramię wzdłuż statywu, na którym zamontowano wymienną cewkę pomiarową. Na konstrukcji umieszczono ruchomy w płaszczyźnie poziomej stabilny dwupoziomowy podest. Na górnym poziomie podestu umieszczano badane cewki, natomiast na dolnym poziomie znajdowały się obwody elektroniczne sterujące obwodem rezonansowym. W celu uzyskania quasi-punktowego pomiaru pola magnetycznego (wartości skutecznej indukcji magnetycznej) wykonano specjalną cewkę pomiarową. Aby zapewnić poprawność stosowanych przeliczeń, cewkę pomiarową poddano wzorcowaniu i wyznaczono jej współczynnik proporcjonalności. Wzorcowanie polegało na umieszczeniu cewki pomiarowej w jednorodnym polu magnetycznym o znanej indukcji, wytworzonym za pomocą

cewek Helmholtza. Pomiar minimalnej wartości skutecznej indukcji magnetycznej, dla której następuje odczyt numeru identyfikacyjnego z transpondera, polegał na dodaniu do ruchomego ramienia stanowiska pomiarowego, specjalnego uchwytu na transpondery. Uzyskano dokładne i powtarzalne pozycjonowanie transponderów zarówno w płaszczyźnie poziomej nad anteną rezonansową jak i w pionowej osi symetrii anteny rezonansowej.



Rysunek 4.2. Wyniki obliczeń i pomiarów rozkładu indukcji magnetycznej w funkcji odległości dla jednej z cewek powietrznych.

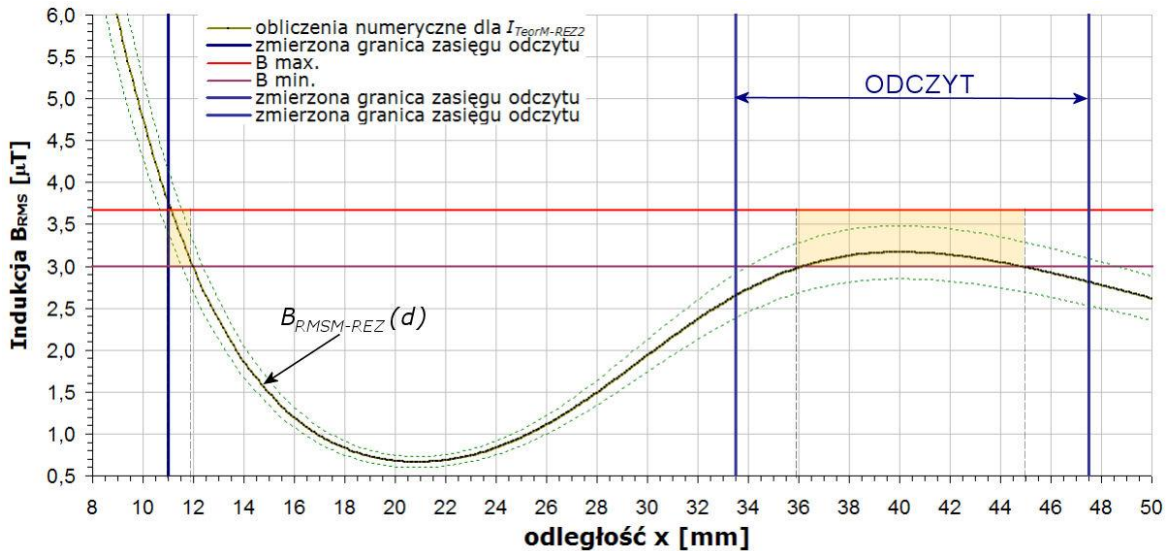
Wyniki obliczeń analitycznych i numerycznych oraz pomiarów rozkładu pola magnetycznego i minimalnej wartości indukcji magnetycznej przy której możliwy jest odczyt numeru identyfikacyjnego (poziom odniesienia) dla jednej z cewek powietrznych przedstawiono na rysunku 4.2. Porównując otrzymane krzywe zauważono dużą zbieżność wyników teoretycznych i numerycznych ze zmierzonymi wartościami skutecznej indukcji magnetycznej, w szczególności na granicy zasięgu odczytu. Wyznaczona minimalna wartość skuteczna indukcji pola magnetycznego dla której następuje odczyt transponderów determinowała w obliczeniach numerycznych granicę zasięgu odczytu, a parametr ten stanowił kryterium oceny jakości danej anteny obwodu rezonansowego. Otrzymane wyniki wykorzystano do dalszych analiz cewek powietrznych w otoczeniu metalicznym oraz anten ferrytowych.

4.2. Antena powietrzna w otoczeniu metalicznym

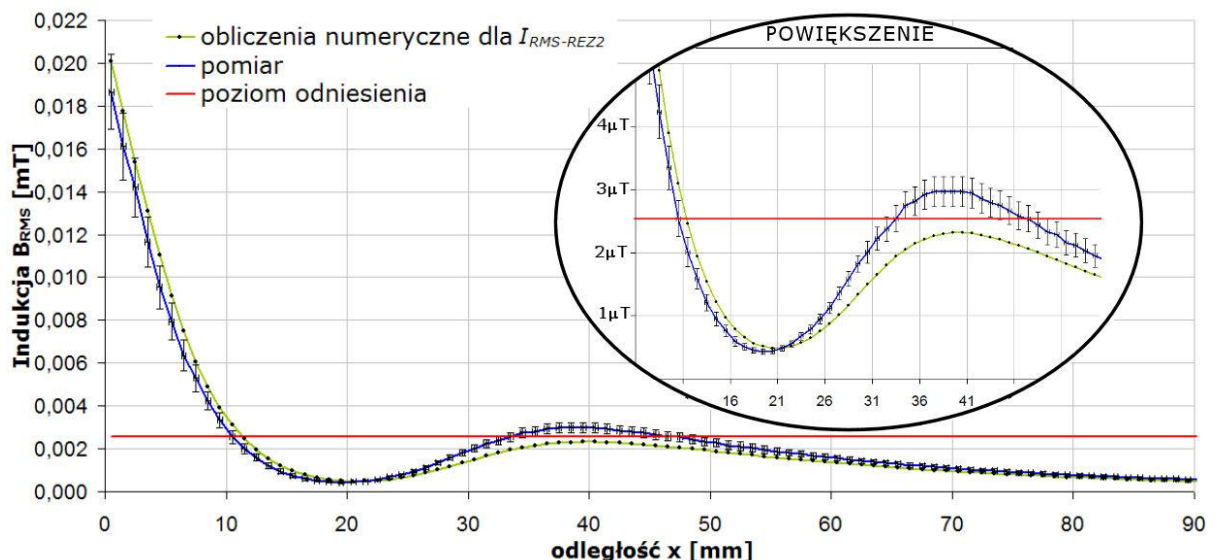
W dalszej kolejności dokonano analizy rozkładu pola magnetycznego dla cewek powietrznych w otoczeniu metalicznym, aby ocenić jego wpływ na działanie czytnika RFID. Otoczenie metaliczne ma istotny wpływ na zasięg odczytu numeru identyfikacyjnego transpondera. Powoduje ono zmianę rozkładu pola magnetycznego przejawiające się w zmianie impedancji układu antenowego czytnika. Zmiana części rzeczywistej impedancji związana jest ze stratami na ciepło w metalowych elementach (na obciążeniu – zwój zwarty) natomiast zmiana części urojonej spowodowana jest modyfikacją linii pola magnetycznego.

W trakcie prac nad optymalizacją geometrii układu antenowego opracowano specjalną metodę predykcji zasięgów odczytu dla anten znajdujących się w otoczeniu metalicznym poprzez sprzężenie wyników z programu COMSOL Multiphysics z programem do symulacji obwodów elektronicznych SPICE. Metoda ta polegała na numerycznym wyznaczeniu wartości skutecznej natężenia prądu płynącego w obwodzie rezonansowym czytnika RFID, którego cewka znajduje się w otoczeniu metalowych elementów. Pozwoliło to za pomocą programu COMSOL Multiphysics na obliczenie teoretycznego przewidywanego rozkładu

poła indukcji magnetycznej w funkcji odległości. Natomiast predykcja zasięgu odczytu jest wynikiem odniesienia wyników symulacji do założonego zakresu indukcji magnetycznej na granicy zasięgu odczytu. Algorytm wyznaczania teoretycznego zasięgu odczytu składa się z pięciu etapów. Opisana w pracy metoda została z powodzeniem wykorzystana do predykcji zasięgów odczytu dla powietrznych i ferrytowych układów antenowych znajdujących się w otoczeniu elementów metalowych. Określenie teoretycznego zasięgu odczytu w otoczeniu metalicznym na podstawie pomiarów i symulacji metodą predykcji granicznego przedziału zasięgu odczytu przedstawiono na przykładzie jednej z cewek powietrznych na rys. 4.3. Dodatkowo w pracy wykonano weryfikację modeli symulacyjnych z testową tuleją stalową poprzez pomiary rozkładu pola indukcji magnetycznej w funkcji odległości (rys. 4.4).



Rysunek 4.3. Przewidywany rozkład wartości skutecznej indukcji magnetycznej w funkcji odległości $B_{RMSM-REZ}(d)$ w osi symetrii cewki powietrznej w otoczeniu metalicznym, w odniesieniu do rzeczywistego zasięgu odczytu i spodziewanego granicznego przedziału zasięgu odczytu.



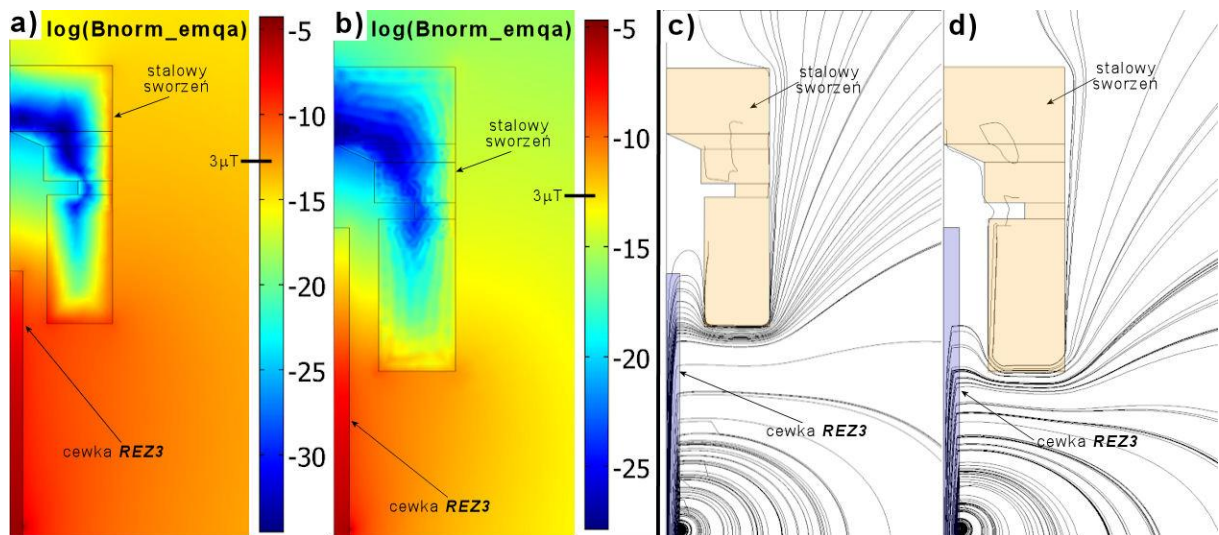
Rysunek 4.4. Wyniki obliczeń numerycznych i pomiarów rozkładu indukcji magnetycznej w funkcji odległości dla cewki powietrznej znajdującej się w otoczeniu stalowej tulei.

W realizacji badań stwierdzono dużą zbieżność wyników teoretycznych z wynikami pomiarów, dlatego takie modele obwodów magnetycznych zostały zastosowane do analiz rozkładu pola magnetycznego. Natomiast do oceny jakości zasięgów odczytu wykorzystano

opracowaną metodykę predykcji granicznego przedziału zasięgu odczytu. Po przeprowadzeniu odpowiednich symulacji, korzystając z metodyki predykcji wyznaczania zasięgów odczytu okazało się, że analizowane cewki powietrzne nie nadawały się do zastosowania ich w czytniku RFID celu, gdyż nie spełniały wszystkich podanych kryteriów oceny jakości. Dlatego też w dalszej części pracy skupiono się na symulacjach oraz pomiarach anten ferrytowych.

4.3. Anteny ferrytowe do czytnika RFID

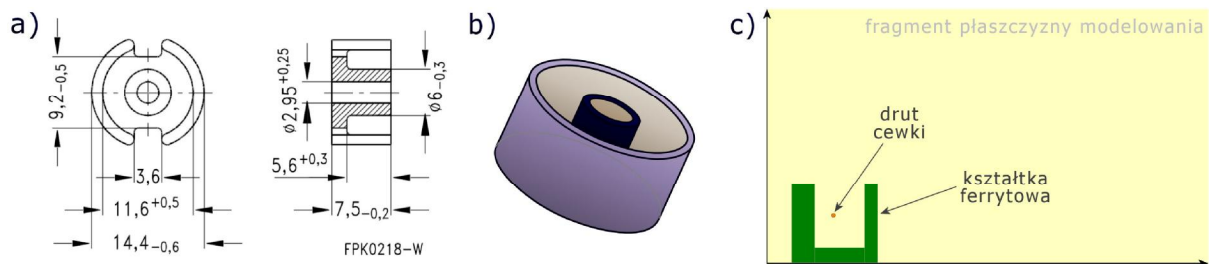
Określone kryteria oceny jakości anteny definiują podstawowe wymagania dla magnetycznych obwodów antenowych czytnika RFID dla konkretnej aplikacji. Cewki powietrzne mieszczące się w otworze sworznia muszą mieć relatywnie małą średnicę, co do uzyskania zadanej indukcyjności wymaga dużej ilości zwojów, a w konsekwencji otrzymuje się to dużą rezystancję cewki. Sytuacja ta wymusza ustalenie się możliwego do osiągnięcia zasięgu odczytu na konkretnym poziomie, który mógłby być zwiększony poprzez zmniejszenie rezystancji występującej obwodzie rezonansowym. Problem ten można rozwiązać poprzez zastosowanie rdzenia z materiału ferromagnetycznego, pozwalającego na uzyskanie tych samych wartości indukcyjności jak w przypadku cewek powietrznych, ale przy znacznie mniejszej ilości zwojów. W czytnikach RFID bardzo często stosowane są ferrytowe anteny prętowe.



Rysunek 4.5. Wynik obliczeń numerycznych dla cewki REZ3 w sworzniu; a) i b) przewidywany rozkład wartości skutecznej indukcji magnetycznej (B_{norm_emqa}) w funkcji odległości (skala logarytmiczna); c) i d) układ linii pola magnetycznego.

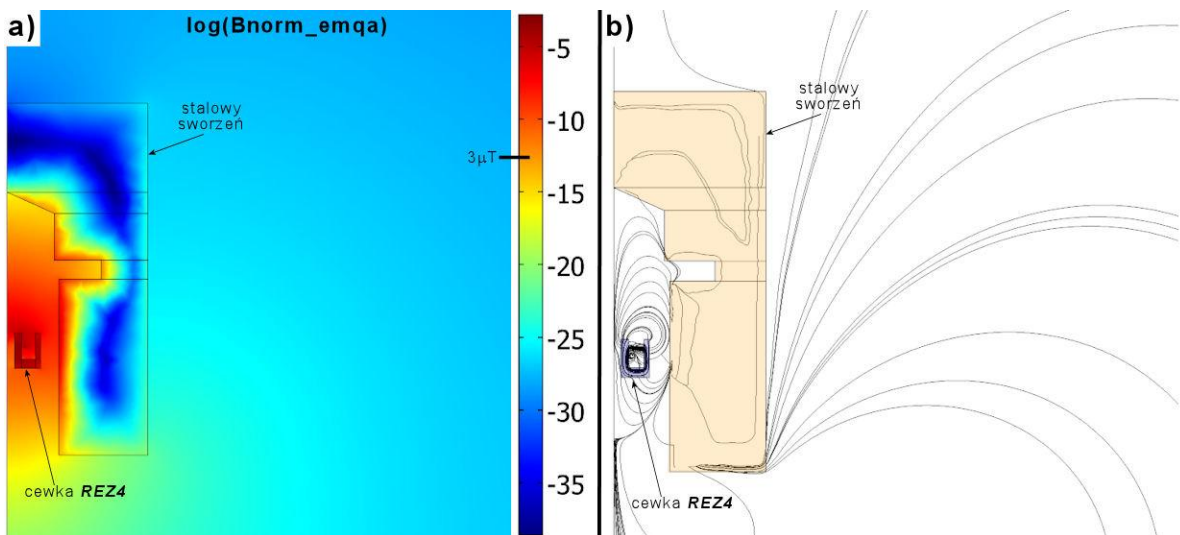
Wykorzystanie opracowanej metody predykcji granicznego przedziału zasięgu odczytu w otoczeniu metalicznym po raz kolejny potwierdziło poprawność opracowanej metodyki, która zastosowana została również do predykcji granicznego zasięgu odczytu w sworzniu przy użyciu prętowej anteny ferrytovej. Wynika z niej, że gdy pręt ferrytowy jest częściowo zanurzony w sworzniu to odczyt możliwy jest w niewielkiej odległości nad anteną, a linie pola magnetycznego bardzo słabo penetrują wewnątrz w sworzniu (rys. 4.5). Natomiast w przypadku gdy pręt umieszczany jest coraz głębiej w sworzniu, to zasięg odczytu znacznie się zmniejszał. W momencie gdy koniec anteny jest zaledwie 2 mm od osłony transpondera (rys. 4.5b, 4.5d), nie jest już możliwy odczyt nawet po przyłożeniu transpondera do końcówki pręta ferrytovej. Dużo lepiej wygląda sytuacja w przypadku odczytu z osłony metalowej przeznaczonej do zabudowy transponderów na powierzchniach płaskich. Niemniej jednak ze względu na określone w pracy kryteria oceny jakości, antena ta nie została wybrana do tej aplikacji.

Z badań wynikało, że w takim przypadku zastosowanie do odczytu tradycyjnych i powszechnie stosowanych w czytnikach RFID anten np. anten pętlowych lub ferrytowo pętlowych nie jest możliwe. Jest to spowodowane tym, że nawet niewielka ilość metalu w otoczeniu takiej anteny powoduje silne tłumienie sygnału, a odczyt ze środka sworznia albo jest niemożliwy, albo nie spełnia wymaganych funkcjonalnych kryteriów zasięgu odczytu. Pozwoliło to na wyciągnięcie wniosku, iż konieczne jest opracowanie anteny kierunkowej. Takie podejście przyczyniło się do opracowania poprawnie działającego układu antenowego czytnika RFID nawet wewnątrz metalowych elementów. Uwzględniając wymiary transpondera oraz sposoby jego montażu na metalowych elementach maszyn dokonano przeglądu oraz analizy dostępnych rodzajów elementów ferromagnetycznych. Wyniki tej pracy pozwoliły na dobór odpowiedniej geometrii obwodu antenowego w postaci ferrytowej anteny kubkowej.



Rysunek 4.6 Wybrana kształtka ferrytowa (P core halves); a) wymiary geometryczne, b) poglądowy rysunek trójwymiarowy, c) model w układzie symetrii osiowej.

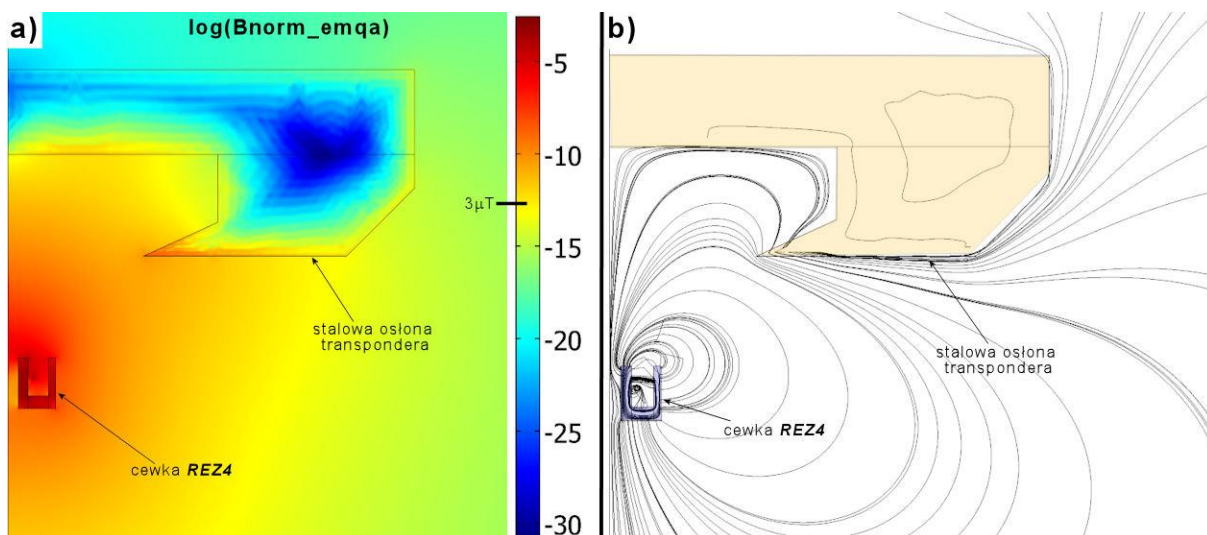
Wybrana ferrytowa kształtka (rys. 4.6), jest kubkowym rdzeniem z materiału N22 dla którego optymalny zakres częstotliwości pracy wynosi od 1 kHz do 200 kHz. Zaletą zastosowania rdzenia ferrytowego o porównywalnych rozmiarach z rozważaną wcześniej cewką powietrzną jest to, że do osiągnięcia tej samej wartości indukcyjności wymagana jest znacznie mniejsza liczba zwojów. W konsekwencji tego można uzyskać większe natężenie prądu płynącego przez antenę. Dlatego możliwe do otrzymania są większe zasięgi odczytu przy tym samym sterującym obwodzie rezonansowym.



Rysunek 4.7. Wynik obliczeń numerycznych dla cewki kubkowej w sworzniu; a) przewidywany rozkład wartości skutecznej indukcji magnetycznej (B_{norm_emqa}) w funkcji odległości, b) układ linii pola magnetycznego.

W celu sprawdzenia możliwości zastosowania kubkowej cewki ferrytowej jako anteny czytnika RFID do odczytu numerów identyfikacyjnych z transpondera zamontowanego zarówno w sworzniu jak i osłonie stalowej, ponownie skorzystano z metody predykcji zasięgu

odczytu. Wyniki tych obliczeń przedstawiono na rysunkach 4.7 i 4.8. W sytuacji umieszczenia anteny w sworzniu, nastąpiła równie nieznaczna zmiana współczynnika samoindukcji jak w przypadku umieszczenia tej samej anteny w testowej tulei stalowej. Dlatego dla wyznaczonej teoretycznie wartości natężenia prądu, otrzymano rozkład indukcji magnetycznej przedstawiony na rysunku 4.7. Natomiast w przypadku zbliżania do osłony metalowej (rys. 4.8) jej wpływ jest praktycznie niezauważalny. W rzeczywistości okazało się, że zmierzone zasięgi odczytu mieszczą się w zakresie przewidywanego granicznego przedziału. Na tej podstawie stwierdzono że antena ta spełniała wszystkie kryteria oceny jakości i została zastosowana w magnetycznym obwodzie antenowym czytnika RFID, mogącym pracować w otoczeniu metalowych elementów.



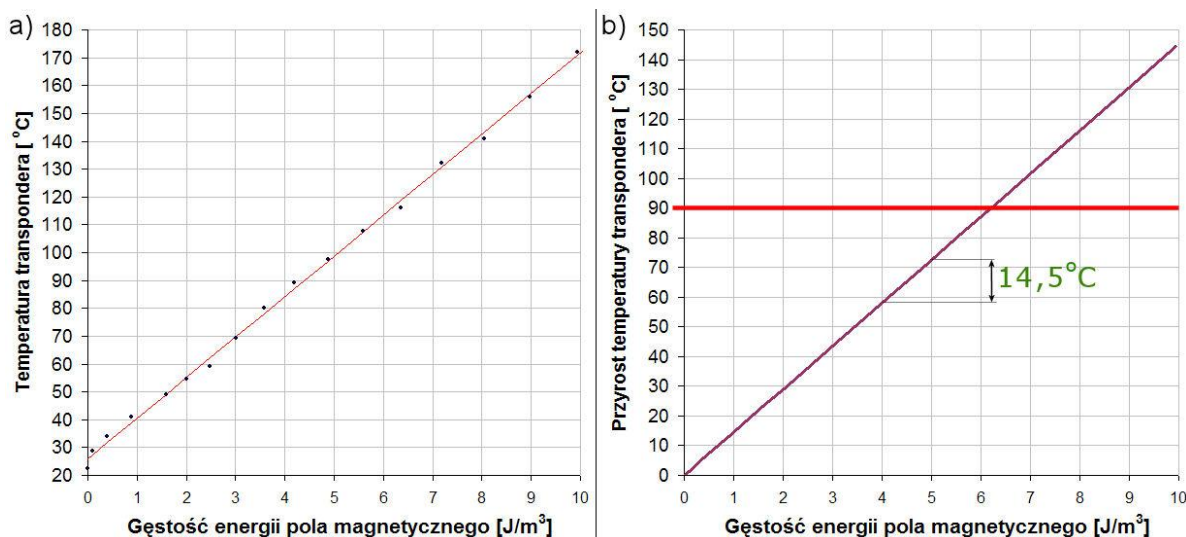
Rysunek 4.8. Wynik obliczeń numerycznych dla cewki kubkowej w pobliżu stalowej osłony do zabudowy transpondera na powierzchniach płaskich elementów maszyn górniczych; a) przewidywany rozkład wartości skutecznej indukcji magnetycznej (B_{norm_emqa}) w funkcji odległości, b) układ linii pola magnetycznego.

Precyzyjne wyznaczenie rozkładu pola magnetycznego, w przypadku antenowych obwodów magnetycznych z rdzeniami ferrytowymi i w obecności metalowych elementów o różnych kształtach w pobliżu anteny, nie jest możliwe w sposób analityczny. Wykorzystanie natomiast do tego celu obliczeń numerycznych w oparciu o metodę elementów skończonych, nawet po przyjęciu pewnych uproszczeń, daje wyniki zbieżne ze zmierzonymi wartościami. Dlatego zastosowanie tego typu narzędzi jest w pełni zasadne oraz pozwala na relatywnie szybkie i dokładne odwzorowanie rzeczywistości wspomagając konstruktorów w rozwiązaniu trudnych zagadnień dla obwodów magnetycznych. Pozwala to na wyciągnięcie wniosku, że modelowane pole elektromagnetyczne można wykorzystać do opracowania układów zdalnej identyfikacji radiowej RFID w trudnych warunkach eksploatacyjnych, w szczególności w otoczeniu metalicznym, co jest zgodne z hipotezą postawioną w pierwszej tezie rozprawy.

5. ANALIZA PRACY TRANSPONDERA W ŚRODOWISKU METALICZNYM ORAZ W PRZESTRZENIACH ZAGROŻONYCH WYBUCHEM

Odpowiedni wybór transpondera ma zasadnicze znaczenie dla niezawodnej pracy systemu ewidencji maszyn górniczych RFID. Na wybór konkretnego typu transpondera miało wpływ kilka założeń i ograniczeń, które wynikały z przystosowania technologii RFID do podziemnych wyrobisk górniczych. Tego typu środowisko silnie utrudnia propagację fal radiowych, a jego bardzo duża tłumienność wynika z dużej wilgotności, wysokiego zapylenia i zasolenia oraz obecności licznych metalowych elementów wyposażenia. Zdalna identyfikacja w takich warunkach możliwa jest z małych odległości, a ze względu na sposób montażu i zabudowy transpondera najlepiej dokonywać odczytu poprzez sprzężenie indukcyjne w polu bliskim. Z tego powodu wybrano technologię RFID pracującą w paśmie 125kHz. Ze względu na zakładany długi czas życia elementów maszyn zdecydowano o zastosowaniu transponderów pasywnych zapewniających bezawaryjną pracę przez okres powyżej 10 lat. Dodatkowymi argumentami przemawiającymi za technologią pasywną był brak możliwości wymiany transpondera pod ziemią spowodowany występowaniem przestrzeni zagrożonej wybuchem oraz brak odpowiedniego dostępu do transpondera w miejscu jego eksploatacji. Dodatkowe ograniczenia wynikały z konieczności zapewnienia wysokiej mechanicznej oraz termicznej wytrzymałości danego elementu maszyny oraz osłony transpondera, co spowodowało silne ograniczenie związane z jego rozmiarami.

Uwzględniając zakładany zakres temperatury otoczenia podczas pracy transpondera od 0 °C do 60 °C, zagrożenie utraty bezpieczeństwa przeciwybuchowego stanowi już przyrost temperatury powyżej 90 °C. Z powodu braku jakichkolwiek informacji katalogowych i technicznych dotyczących możliwości nagrzewania się wybranego transpondera w polu magnetycznym, koniecznym było przeprowadzenie eksperymentu rozstrzygającego o zagrożeniu jakie niesie transponder dla bezpieczeństwa przeciwybuchowego. W tym celu zbudowane zostało specjalne stanowisko pomiarowe, w którym transponder był umieszczany w polu magnetycznym występującym w szczelinie rdzenia ferrytowego, a jego temperaturę rejestrowano przy pomocy kamery termowizyjnej.



Rysunek 5.1. Zależność a) temperatury, b) przyrostu temperatury powierzchni transpondera od gęstości energii pola magnetycznego uzyskiwanej w szczelinie rdzenia ferrytowego.

W celu oceny możliwości nagrzewania się transpondera znajdującego się w polu magnetycznym przeprowadzono obserwacje termiczne. Stabilizując konkretną wartość skuteczną indukcji magnetycznej w szczelinie rejestrowano kamerą termowizyjną temperaturę powierzchni znacznika. Przedstawione na rysunku 5.1 wyniki obserwacji

termicznej transpondera w funkcji gęstości energii magnetycznej odniesiono do prostej wyznaczonej metodą najmniejszych kwadratów. Analiza tych krzywych pozwala na wyciągnięcie wniosku, że istnieje takie pole magnetyczne (o gęstości energii ok. $6,4 \text{ J/m}^3$) dla którego zostanie przekroczona maksymalna dozwolona temperatura powierzchni, przy której transponder stanowić będzie zagrożenie bezpieczeństwa przeciwwybuchowego (rys. 6.5b). Należy w tym miejscu podkreślić, że bez dodatkowych ograniczeń urządzenie to nie zostałoby dopuszczone do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem.

Przeprowadzone zostały również obserwacje termiczne dla maksymalnej indukcji magnetycznej jaką można było uzyskać w sposób stabilny na zbudowanym stanowisku pomiarowym. Z obserwacji wynikało, że transpondery umieszczone w polu magnetycznym o indukcji $5,6 \text{ mT}_{\text{RMS}}$ ulegały całkowitemu uszkodzeniu w dość charakterystyczny sposób. Następowoło to w pobliżu temperatury $220 \text{ }^\circ\text{C}$. Uszkodzenie transpondera wiązało się z gwałtowną zmianą jego temperatury powierzchni oraz pęknięciem i wyciekami brązowej substancji. Po tym eksperymencie odczyt numeru identyfikacyjnego nie był już możliwy, dlatego badanie to było badaniem niszcącym.

Podsumowując, z przeprowadzonej obserwacji termicznej wynikało jednoznacznie, że zarówno poprawnie działający jak i uszkodzony transponder stanowi zagrożenie bezpieczeństwa przeciwwybuchowego. Dlatego w celu wdrożenia tego urządzenia do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem podziemnych wyrobisk górniczych wymagane jest zastosowanie odpowiednich środków ochrony przeciwwybuchowej zapewniających bardzo wysoki poziom bezpieczeństwa.

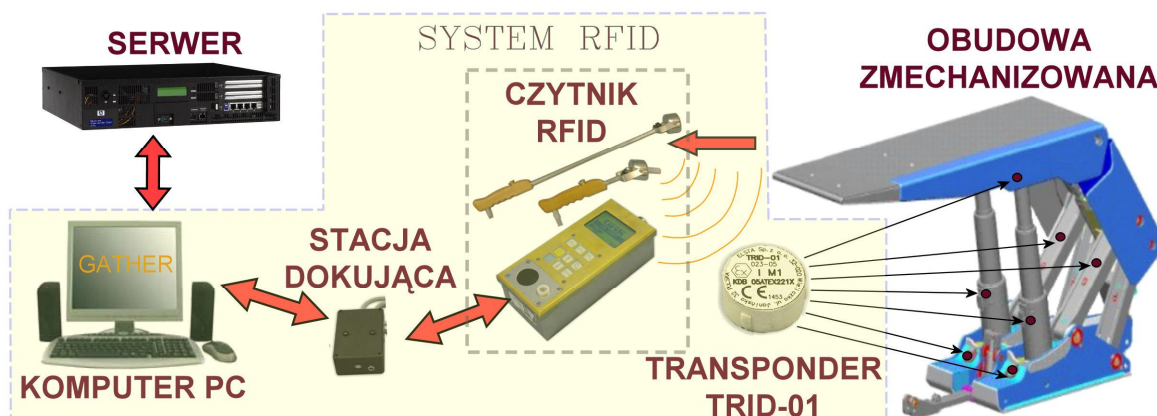
Wybrana geometria ferrytowej anteny kubkowej pozwoliła na spełnienie wszystkich wymagań funkcjonalnych, umożliwiając odczyt numerów identyfikacyjnych z wymaganych przez aplikację odległości w otoczeniu metalowych elementów i powodowała nieznaczne podgrzanie transpondera w trakcie odczytu. W przypadku konstrukcji przeciwwybuchowej transpondera występowało jednak kilka innych problemów, które musiały być konieczne rozwiązane, aby można było dopuścić to urządzenie do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Pomimo faktu, że opracowany czytnik RFID dostarczał bezpieczny poziom energii, nie było gwarancji że próba odczytu numeru identyfikacyjnego innym czytnikiem nie spowoduje przekroczenia dozwolonej temperatury powierzchni. Dodatkowym problemem były widoczne na krawędzi transpondera wystające zaciski oraz brak określenia przez producenta maksymalnych wartości elementów magazynujących energię zastosowanych w jego konstrukcji. W związku z tym poza możliwością zainicjowania zapłonu termicznie, przy dużych napięciach i prądach występujących w wewnętrznych obwodach elektronicznych transpondera, istniało również zagrożenie zapłonu inicjowanego iskrowo. Na problem ten nakładała się również możliwość występowania pól magnetycznych o dużych natężeniach pochodzących od innych źródeł niż czytniki RFID.

Z przeprowadzonych badań i obserwacji termicznych wynikało, że wybrany transponder bez zastosowania środków ochrony stanowi zagrożenie bezpieczeństwa przeciwwybuchowego. Dodatkowo zauważono że przyrost temperatury uszkodzonych transponderów jest większy niż dla poprawnie działających. Na podstawie otrzymanych wyników zaproponowano konstrukcję transpondera zapewniającą bezpieczeństwo przeciwwybuchowe, co zostało dodatkowo wykazane kolejnymi pomiarami termicznymi. Opracowana konstrukcja dopuszczona została do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Mając to na uwadze, można było przystąpić do konstrukcji głowicy antenowej czytnika RFID przy zastosowaniu ferrytowej anteny kierunkowej. Warto wspomnieć, że transponder typu TRID-01 jest sprzedawany polskim kopalniom oraz producentom maszyn górniczych i do końca 2009 roku oznakowano nim ponad 12 tysięcy elementów sekcji obudowy zmechanizowanej pracujących w polskich kopalniach.

6. CZYTNIK RFID PRZYSTOSOWANY DO PRACY W PODZIEMNYCH ZAKŁADACH GÓRNICZYCH

System identyfikacji elementów maszyn górniczych jest przeznaczony do prowadzenia gospodarki materiałowej w kopalniach, w szczególności eksploatujących pokłady węglowe. Opisany system identyfikacji elementów maszyn górniczych został zrealizowany przy współpracy firmy Z.U.E. ELSTA z Wieliczki, Katedry Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, Centrum Mechanizacji Górnictwa KOMAG oraz Politechniki Śląskiej z Gliwic. Składa się on z następujących elementów (rys. 6.1):

- transponderów typu TRID-01, montowanych podczas produkcji lub remontu obudowy w elementach nośnych ścianowej obudowy zmechanizowanej,
- czytnika RFID, złożonego z:
 - mikrokomputera typu TRMC-01 obsługiwanego przez operatora,
 - lancy odczytującej typu TRH-01 zakończonej odpowiednio ukształtowaną głowicą odczytującą za pomocą której dokonywany jest odczyt numeru identyfikacyjnego z transpondera,
- stacji dokującej typu SDR-01, która umożliwia komunikację z komputerem PC oraz ładowanie akumulatorów mikrokomputera TRMC 01,
- oprogramowania komputerowego GATHER obsługującego bazę danych systemu i pracującego w środowisku Windows.



Rysunek 6.1. Architektura i obieg danych w systemie zdalnej identyfikacji sekcji obudowy zmechanizowanej.

Pomiary skonstruowanych w ramach pracy elektronicznych obwodów toru detekcyjnego głowicy odczytującej czytnika RFID wykazują, że dzięki zastosowaniu nietypowych rozwiązań układowych otrzymano bardzo dobre parametry elektryczne przy zachowaniu dużej dynamiki sygnału wejściowego i wysokiej odporności na zakłócenia. Ze względu na dużą dobroć obwodu rezonansowego, osiągnięta graniczna amplituda sygnału modulującego dla którego następuje odczyt, występuje na poziomie fluktuacji napięcia obwodu rezonansowego a uzyskane wyniki znajdują się na granicy możliwości technicznych tego typu rozwiązań układowych.

Czytnik RFID zawierający głowicę antenową opracowaną poddano testom oceny bezpieczeństwa przeciwwybuchowego oraz kompatybilności elektromagnetycznej. Uzyskano pozytywne opinie dotyczące zgodności z wymaganiami norm zharmonizowanych z dyrektywami 94/9/WE (ATEX) i 2004/108/WE (EMC). Jednocześnie uzyskano certyfikat badania typu WE na opracowany w ramach pracy moduł transpondera RFID. Pozwoliło to na wdrożenie systemu identyfikacji elementów maszyn górniczych do eksploatacji w podziemiach kopalń.

7. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono możliwość zastosowania badań modelowych pola elektromagnetycznego do optymalizacji konstrukcji obwodu antenowego w celu zapewnienia radiowej identyfikacji obiektów RFID usytuowanych w otoczeniu metalicznym oraz analizę zjawisk cieplnych indukowanych przez zewnętrzne pole magnetyczne w transponderach systemu RFID przeznaczonych do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Znaczną uwagę poświęcono zagadnieniu niezawodnej zdalnej identyfikacji transponderów zabudowanych w metalowych elementach maszyn górniczych. Użytkowanie systemu RFID w bezpośrednim otoczeniu metalicznym rzutowało na wybór typu transpondera, a tym samym na wybór radiowej częstotliwości roboczej oraz na sposób budowy głowicy antenowej czytnika RFID. Uzyskane w pracy podzespoły są obecnie istotnymi elementami systemu identyfikacji obudów górniczych RFID. Opracowanie całego systemu zostało zrealizowane we współpracy czterech ośrodków (KOMAG, Politechnika Śląska, AGH, ELSTA).

Realizując przedstawione badania uzyskano następujące, istotne zdaniem autora, wyniki:

- zaprojektowano i zbudowano dwa stanowiska badawcze konstrukcyjnie przewidziane do pomiarów (1) rozkładu indukcji pola magnetycznego w przestrzeni wokół głowicy antenowej czytnika RFID oraz (2) do wyznaczania temperatury powierzchni transpondera umieszczonego w zewnętrznym polu magnetycznym,
- przeprowadzono analizę warunków środowiskowych w miejscach przewidywanej instalacji systemu RFID ukierunkowanej na zagadnienia wykonania aparatury przeznaczonej do eksploatacji w przestrzeniach zagrożonych wybuchem,
- przedstawiono metodykę projektowania i szczegółowe rozwiązania układów elektronicznych mających na celu spełnienie zasad iskrobezpieczeństwa i kompatybilności elektromagnetycznej (EMC),
- opracowano układy elektroniczne głowicy antenowej czytnika RFID i konstrukcji transpondera RFID w wykonaniu przeciwwybuchowym i wykonano analizy bezpieczeństwa przeciwwybuchowego zrealizowanych rozwiązań,
- zastosowano specjalizowane środowisko COMSOL Multiphysics do obliczeń i modelowania pola magnetycznego w obszarze roboczym głowicy antenowej czytnika RFID i transpondera RFID,
- opracowano procedury, wykorzystujące rezultaty modelowania pola magnetycznego w obszarze pomiędzy anteną czytnika RFID a transponderem RFID, umożliwiające optymalizację konstrukcji anteny,
- na podstawie przeprowadzonych badań modelowych oraz eksperymentów weryfikujących poszczególne konstrukcje wytypowano jako układ antenowy kubkową antenę ferrytową,
- opracowano metody badawcze umożliwiające opis zjawisk cieplnych w transponderze RFID umieszczonym w zewnętrznym zmiennym polu magnetycznym

Uzyskane rezultaty odnoszą się bezpośrednio do sformułowanych we wstępie tez pracy. Opracowane metody projektowania podzespołów RFID w oparciu o procedury modelowania i sterowania polami magnetycznymi okazały się skuteczne. Skonstruowane przy wykorzystaniu tych metod urządzenia zostały wdrożone do przemysłowej eksploatacji. Podzespoły te obecnie są ważnymi składnikami systemu identyfikacji obudów górniczych RFID wdrożonego do eksploatacji w polskim górnictwie.

Publikacje doktoranta związane z rozprawą doktorską

- [1] Fitowski K., Jankowski H., Jankowski-Mihulowicz P., Krzak Ł., Meder A., Stankiewicz J., **Szczurkowski M.**, Warzecha M., Worek C.: *RFID collection system of mining equipment in underground environment*, IV Międzynarodowa Konferencja „Nowe technologie elektryczne i elektroniczne oraz ich wdrażanie w przemyśle”, Zakopane 21-24 czerwiec 2005, Materiały Konferencyjne, strony: 250-253.
- [2] Fitowski K., Jankowski H., Krzak Ł., Stankiewicz J., **Szczurkowski M.**, Warzecha M., Worek C.: *System identyfikacji elementów maszyn górniczych z wykorzystaniem technologii RFID*, PWT 2005: Poznańskie Warsztaty Telekomunikacyjne: X poznańska konferencja naukowo-dydaktyczna w dziedzinie telekomunikacji i elektroniki: Poznań 8-9 grudnia 2005, Instytut Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej przy wsparciu IEEE Communications Soc., Chapter Communications – Poznań, s. 281–286.
- [3] Fitowski K., Jankowski H., Jaszczuk M., Jenczyk D., Krzak Ł., Pieczora E., Stankiewicz J., **Szczurkowski M.**, Rogala J., Warzecha M., Worek C.: *RFID – nowa metoda identyfikacji elementów w podziemiach kopalń*, miesięcznik „Napędy i Sterowanie” nr 02, luty 2006r, strony 82-88.
- [4] Fitowski K., Jankowski H., Jaszczuk M., Jenczyk D., Krzak Ł., Pieczora E., Stankiewicz J., **Szczurkowski M.**, Rogala J., Warzecha M., Worek C.: *Nowoczesny sposób identyfikacji elementów sekcji obudowy ścianowej za pomocą technologii RFID*, Konferencja Naukowo-Techniczna 2006 "NOWE TRENDY W BUDOWIE MASZYN GÓRNICZYCH" 27-28 luty 2006 r. Centrum Konferencyjno-Hotelowe GLIMAR Wysowa-Zdrój, strony 37-39.
- [5] Jenczyk D., Krzak Ł., **Szczurkowski M.**, Rogala J., Warzecha M., Worek C.: *Wykorzystanie technologii RFID oraz nowoczesnych systemów bazodanowych do ewidencji części maszyn górniczych i oceny ich stanu technicznego*, Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa - Czasopismo Naukowo-Techniczne, nr 5 (424), Maj 2006, Wydawca: Centrum Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa „EMAG”, strony 38-45.
- [6] Jankowski H., Krzak Ł., **Szczurkowski M.**, Warzecha M., Worek C.: *Technologia radiowej identyfikacji obiektów RFID*, Wiadomości Elektrotechniczne, nr 9/2006, strony: 8-14.
- [7] **Szczurkowski M.**, Jankowski H., Worek C., Maksymowicz L. J.: *Czytnik RFID do identyfikacji metalicznych obiektów przemysłowych*, IX Konferencja Naukowa Czujniki Optoelektroniczne i Elektroniczne COE 2006, Kraków - Zakopane 19-22 czerwca 2006, strony 519-522.
- [8] **Szczurkowski M.**: *Hardware and software solutions in RFID reader*, Tools of information technology: proceedings of the 1st conference: Rzeszów, Poland 15 September 2006 pp. 101-106.
- [9] Worek C., Krzak Ł., **Szczurkowski M.**, Warzecha M., Jenczyk D., Rogala J.: *Wykorzystanie technologii RFID oraz nowoczesnych systemów bazodanowych do ewidencji części maszyn górniczych i oceny ich stanu technicznego*, Konferencja Naukowo-Techniczna 2006 „Systemy i urządzenia automatyzacji procesów technologicznych i kontroli bezpieczeństwa w przemyśle wydobywczym”, Szczawnica 24 ÷ 26 maja 2006, strony 135-142.
- [10] **Szczurkowski M.**, Jankowski H., Worek C., Maksymowicz L. J.: *RFID reader designing for identification of industrial metallic objects*, Optoelectronic and Electronic Sensors VI, Tadeusz Pisarkiewicz, Editor, Proceedings of SPIE Vol.6348 OT, October 2006.
- [11] Worek C., Krzak Ł., **Szczurkowski M.**, Warzecha M., Jankowski D.: *Czytnik RFID przystosowany do pracy w podziemnych wyrobiskach górniczych*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 9/2007, strony: 94-97.
- [12] **Szczurkowski M.**, Jankowski H., Worek C., Maksymowicz L. J., Meder A.: *Praktyczne doświadczenia wdrożeniowe w zakresie wykorzystania technologii RFID oraz nowoczesnych systemów bazodanowych do ewidencji części maszyn górniczych* Szkoła Eksploatacji Podziemnej 25-29.02.2008, Materiały Konferencyjne.
- [13] Worek C., **Szczurkowski M.**: *Kompatybilność elektromagnetyczna w podziemiach wyrobisk górniczych*, Przegląd Telekomunikacyjny, Wiadomości Telekomunikacyjne, Tom 82, Numer 7, strony 268–270, 2009.
- [14] Worek C., **Szczurkowski M.**: *Kompatybilność elektromagnetyczna urządzeń elektronicznych przeznaczonych do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem*, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Tom 86, Numer 3, strony 176–178, 2010.
- [15] Rogala-Rojek J., Piecha A., **Szczurkowski M.**, Kozubek A., Siedlaczek A.: *„Doświadczenia eksploatacyjne z wdrożenia systemu elektronicznej identyfikacji elementów sekcji zmechanizowanych obudów ścianowych w KWK Marcel”*, Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Kraków, 22–26 lutego 2010, Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej 2010, Wydawca: Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Kraków 2010.