

Efektywność identyfikacji towarów w magazynach stosujących technikę RFID

Karol Siwiec, Michał Ćmil, Andrzej Paszkiewicz, Bartosz Pawłowicz, Łukasz Pachla
Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów

Streszczenie: Technika RFID odgrywa kluczową rolę w automatyzacji procesów logistycznych, umożliwiając szybką i bezdotykową identyfikację towarów w rozproszonych środowiskach magazynowych. W artykule przeanalizowano koncepcję badań nad efektywnością tej technologii, skupiając się na szybkości odczytu i sprawności samych czytników RFID w różnych warunkach operacyjnych. Największą uwagę zwrócono na wydajność systemów RFID zależną zarówno od konstrukcji urządzeń, jak i od czynników środowiskowych, takich jak wilgotność, zasłonięcie identyfikatorów oraz rozmieszczenie anten. Wstępne pomiary potwierdzają, że optymalne wdrożenie RFID może znacząco zwiększyć efektywność zarządzania zapasami, jednocześnie minimalizując błędy identyfikacji, co czyni tę technikę przyszłością logistyki i zarządzania magazynem.

Słowa kluczowe: RFID, inteligentny magazyn, efektywność identyfikacji, Przemysł 4.0, IoT

1. Wprowadzenie

Rozwój technologiczny ma coraz większy wpływ na wiele dziedzin życia, w tym na zarządzanie towarami w magazynach. Nowoczesne technologie, takie jak technika radiowej identyfikacji obiektów RFID (ang. *Radio Frequency Identification*), umożliwiają bezdotykową i zautomatyzowaną identyfikację towarów, która znacząco ułatwia pracę w dynamicznych środowiskach magazynowych oraz centrach logistycznych. RFID stosowane są obecnie w wielu branżach, m.in. w zarządzaniu magazynami, śledzeniu produktów w łańcuchu dostaw, kontroli dostępu, a nawet w systemach antykradzieżowych w sklepach. Innowacyjność RFID polega na możliwości jednoczesnego odczytu wielu identyfikatorów RFID bez potrzeby bezpośredniego skanowania widocznych kodów, co odróżnia ją od tradycyjnych kodów kreskowych, które wymagają wizualnego kontaktu skanera z kodem.

2. Zastosowania RFID w obszarze inteligentnych magazynów

Połączenie techniki RFID z Internetem Rzeczy IoT (ang. *Internet of Things*) otwiera dodatkowe możliwości w monitorowaniu i zarządzaniu zasobami w czasie rzeczywistym. IoT

odnosi się do sieci urządzeń, które komunikują się między sobą przez Internet, co umożliwia zdalne sterowanie i automatyzację procesów. Połączenie to stanowi fundament przyszłych inteligentnych środowisk magazynowych [1]. Wyniki najnowszych badań podkreślają rosnącą innowacyjność i wydajność czytników RFID, które przy odpowiedniej konfiguracji mogą znacznie poprawić procesy magazynowe i logistyczne. Technika radiowej identyfikacji obiektów, jako istotna część Przemysłu 4.0, jest często łączona z innymi technologiami takimi jak systemy wspomagania decyzji DSS (ang. *Decision Support Systems*) oraz autonomiczne roboty mobilne AMR (ang. *Autonomous Mobile Robot*) w nowoczesnych środowiskach magazynowych. Mimo że rozwiązanie to jest efektywne, wiąże się z koniecznością poniesienia znacznych kosztów, zarówno związanych z zakupem oraz implementacją, jak i utrzymaniem takiego systemu [2]. Koszty wdrożenia innowacyjnych rozwiązań w inteligentnych magazynach budzą znaczne obawy wśród przedsiębiorców i ekspertów branżowych. Według badań, blisko 80 % ankietowanych uważa, że są one szczególnie wysokie, co stanowi istotne wyzwanie dla mniejszych firm [3].

Nowoczesne środowiska magazynowe wymagają niezawodnych, zautomatyzowanych systemów zarządzania, takich jak systemy zarządzania magazynem WMS (ang. *Warehouse Management System*). Wsparcie systemów WMS technologią RFID umożliwia zwiększenie dokładności inwentaryzacji o blisko 30 % [4]. Włączenie do tego zestawu urządzeń IoT pozwala na dalszą automatyzację i cyfryzację procesów zarządzania magazynem. Przykładem jest implementacja takiej architektury w fabryce tekstylnej, gdzie efektywność zarządzania magazynem wzrosła o około 88 % [5].

Technika RFID odgrywa kluczową rolę na każdym etapie łańcucha dostaw, co potwierdzają badania przeprowadzone na procesie dostaw świeżych kasztanów z wykorzystaniem modelu VCOR (ang. *Value-Chain Operation Reference*). Po wprowadzeniu systemu RFID efektywność identyfikacji wynio-

Autor korespondujący:
Karol Siwiec, k.siwiec@prz.edu.pl

Artykuł recenzowany
nadesłany 18.11.2024 r., przyjęty do druku 09.04.2025 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

sła 99,4 % dla opakowań oraz 98,7 % dla palet [7]. RFID jest również kluczowe w zarządzaniu łańcuchem dostaw SCM (ang. *Supply Chain Management*). Według prognoz i szacunków firmy Procter & Gamble implementacja RFID oraz elektronicznych kodów produktów EPC (ang. *Electronic Product Code*) przyniesie oszczędności na poziomie ponad miliarda dolarów [8].

Techniką tą zainteresowały się również niektóre jednostki militarne, rozważając jej wykorzystanie w obsłudze swoich magazynowych systemów logistycznych. W pracy [15] zaprezentowano zbiorcze podsumowanie kilkunastu badań dotyczących zastosowania RFID w zarządzaniu łańcuchem dostaw oraz jej wpływu na operacje magazynowe. Wszystkie analizowane aspekty, takie jak dostawa, wysyłka czy pakowanie, po wdrożeniu systemów RFID odnotowały wzrost wydajności w zakresie od 5 % do 26 %.

Przykładową implementacją RFID w inteligentnym środowisku magazynowym jest system *RF-Detector* zarządzający magazynem chemikaliów. Eksperymenty przeprowadzone w tym magazynie wykazały, że dzięki zastosowaniu RFID średnia dokładność detekcji poziomów zapasów wyniosła 93 %, co w porównaniu z tradycyjnymi magazynami jest dobrym wynikiem [11].

Efektywność systemów wykorzystujących RFID została sprawdzona w przemyśle motoryzacyjnym, gdzie dowiedziono, że technika ta umożliwiła monitorowanie zapasów w czasie rzeczywistym oraz zapobiega błędom sekwencjonowania. Przekłada się to bezpośrednio na zmniejszenie kosztów operacyjnych i zwiększenie logistyki przychodzącej [12]. Rozbudowa takiego magazynu o system RTLS (ang. *Real-Time Locating/Location Systems*) umożliwia dodatkowo śledzenie produktów z dokładnością do 50 cm, co wykazała implementacja systemu *Sunstone-RTLS* [13].

Technika radiowej identyfikacji obiektów jest systematycznie zestawiana z tradycyjnymi kodami kreskowymi. Przeprowadzone zostały badania, które wykazały, że średni czas skanowania produktów z wykorzystaniem RFID wyniósł niespełna 10 sekund w porównaniu z blisko 25 sekundami w przypadku skanowania tradycyjnych kodów kreskowych [14]. Oprócz poprawy wydajności wskazywane są również takie korzyści, jak zwiększenie bezpieczeństwa. W pracy [16] zaproponowano integrację urządzeń IoT z technologiami blockchain i RFID w ramach systemu WMS przeznaczonego do przechowywania dzieł sztuki i przedmiotów kolekcjonerskich. Dzięki temu każdy ruch towarów w magazynie lub poza nim jest automatycznie rejestrowany za pomocą skanowania RFID i zapisywany w celu dalszej analizy.

Predykcja ilości zapasów w odniesieniu do zapotrzebowania stanowi kluczowy element zarządzania magazynem. Istnieje wiele analitycznych metod prognozowania popytu na produkty, takich jak metody jakościowe, algorytmy genetyczne czy metoda Boxa-Jenkinsa [17, 18]. Stosując RFID oraz IoT możliwe jest dokładne zbieranie aktualnych stanów magazynowych, co umożliwia prognozowanie popytu. Aby przeprowadzić różne scenariusze wspomagające przewidywanie popytu można zastosować model cyfrowego bliźniaka magazynu [6], który symuluje obiekt fizyczny lub proces w określonym czasie.

Reasumując, wykorzystanie techniki radiowej identyfikacji obiektów oraz IoT w środowisku magazynowym znacznie zwiększa efektywność operacyjną i zapewnia zrównoważone zarządzanie łańcuchem dostaw. Potwierdziły to symulacje przeprowadzone za pomocą *Anylogic 7.0.2 Professional* [9]. Użycie techniki RFID w magazynach oraz na pozostałych etapach łańcucha dostaw skraca czas cyklu produkcyjnego, co prowadzi do zwiększenia przepustowości linii produkcyjnej. Wpływa to pozytywnie na wydajność każdego środowiska magazynowego [10].

3. System RFID zaimplementowany w makietę inteligentnego magazynu

Podstawowy system identyfikacji bazujący na technice RFID składa się z dwóch podstawowych elementów: transpondera RFID (znanego również jako identyfikator) i czytnika. Transponder, czyli nośnik danych, zawiera mikrochip do przechowywania informacji oraz antenę do ich przesyłania. Z kolei czytnik RFID, będący najczęściej elementem aktywnym, wysyła falę elektromagnetyczną, która aktywuje znajdujący się w pobliżu identyfikator. Aktywowany transponder odpowiada, nadając sygnał radiowy z zapisanymi danymi, które są odbierane i interpretowane przez czytnik. Zasięg wymiany informacji między transponderem a czytnikiem zależy od stosowanej częstotliwości i może wynosić od kilku centymetrów do nawet kilkunastu metrów. Rysunek 1 przedstawia schemat ideowy działania systemu korzystającego z techniki RFID.

Identyfikatory RFID występują w różnych formach: plastikowych kart, breloków, naklejek oraz w bardziej zaawansowanych wersjach tektonicznych i drukowanych w technologii przyrostowej. Każdy identyfikator składa się z mikrozipa i anteny, które umożliwiają bezdotykową wymianę informacji z czytnikiem. Wyróżniamy trzy podstawowe rodzaje transponderów RFID:

- RO (ang. *Read Only*) – użytkownik może odczytać jedynie numer identyfikacyjny, przypisany do transpondera podczas produkcji, bez możliwości jego modyfikacji;
- RW (ang. *Rewritable*) – pozwalają na wielokrotny zapis i odczyt danych, co umożliwia elastyczne zarządzanie informacjami;
- WORM (ang. *Write Once Read Many*) – dane mogą być zapisane tylko raz, po czym można je odczytywać wielokrotnie.

System RFID zawiera również czytniki, które przeprowadzają wymianę danych z identyfikatorem RFID. Czytniki mogą mieć anteny wbudowane lub zewnętrzne, przy czym anteny zewnętrzne pozwalają na większą elastyczność montażu, co jest korzystne w dużych magazynach.

Wyróżnia się dwa rodzaje polaryzacji anten: kołową i liniową. Anteny o polaryzacji kołowej są bardziej uniwersalne, umożliwiają odczyt transponderów niezależnie od ich orientacji, jednak mają mniejszy zasięg niż anteny o polaryzacji liniowej, które wymagają precyzyjnej orientacji identyfikatorów. Dzięki wszechstronności, odporności na trudne warunki i możliwości implementacji na szeroką skalę, RFID znajduje zastosowanie nie tylko w logistyce, ale również w inteligentnych systemach zarządzania, systemach kontroli dostępu oraz wielu innych sektorach, gdzie automatyczna identyfikacja i śledzenie obiektów są kluczowe dla efektywności.

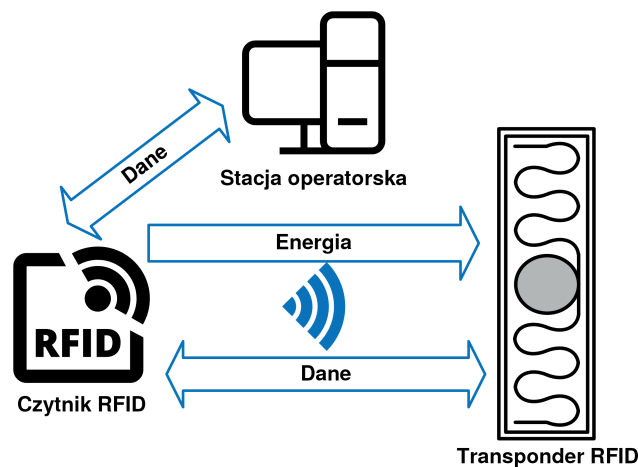
Sama budowa transpondera jest relatywnie prosta (rys. 2). Na jego budowę składają się trzy elementy.

Mikrokontroler, czyli układ scalony, który przechowuje unikalne informacje identyfikacyjne i dodatkowe dane o obiekcie. Może mieć pamięć od 64 bitów do 2 kilobajtów i odpowiada za odbieranie oraz przetwarzanie sygnałów od czytnika RFID.

Antena odbiera i przesyła sygnały do czytnika. Jej kształt, wymiary i rodzaj zależą od zastosowania i częstotliwości działania. Anteny mogą mieć różne konstrukcje, np. dipolowe (dla częstotliwości HF) lub płytkowe (dla częstotliwości UHF).

Obudowa, na której zamontowane są chip i antena, jest wykonana z wytrzymałych materiałów, odpornych na czynniki środowiskowe, takie jak wilgoć, ciepło czy chemikalia. Często stosowana jest dodatkowa warstwa ochronna, np. z PVC, żywicy epoksydowej lub papieru samoprzylepnego, która zabezpiecza transponder RFID i umożliwia jego trwałe przymocowanie do obiektu.

Jak wspomniano, mikrokontroler ma wbudowaną pamięć, jednak struktura danych w pamięci zależy od typu zastosowanego chipu i systemu RFID (np. LF, HF, UHF). Pamięć identyfika-



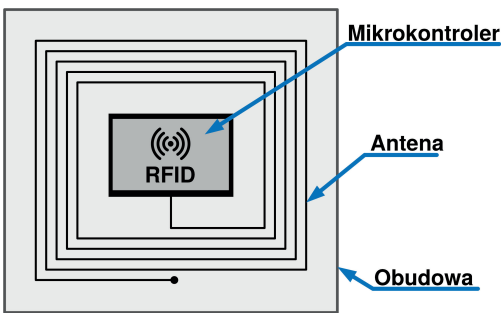
Rys. 1. Schemat działania systemu RFID
Fig. 1. Schematic of the RFID system

tora RFID jest zwykle podzielona na banki pamięci lub segmenty, które służą do przechowywania różnych rodzajów danych. W tabeli 1. przedstawiono typową strukturę danych umieszczonych w pamięci wbudowanej w mikrokontroler:

Podczas tworzenia koncepcji makiety inteligentnego magazynu wyposażonego w technikę RFID celem identyfikacji obiektów w rozproszonych środowiskach magazynowych, jako jeden z aspektów wpływających na efektywność identyfikacji rozważono sposób implementacji identyfikatorów RFID. Na potrzeby wstępnych pomiarów przygotowano dwie wersje pojemników z transponderem RFID. Obydwie wersje zostały przedstawione na rys. 3, z zaznaczeniem miejsca przewidzianego na lokalizację identyfikatora.

W wersji A pojemnika miejsce przewidziane na transponder RFID znajduje się wewnątrz pojemnika. Oznacza to, że identyfikator musi być implementowany na etapie produkcji, co czyni tę wersję lepszym wyborem pod kątem bezpieczeństwa. W tej wersji usunięcie identyfikatora jest równoznaczne z koniecznością uszkodzenia produktu. Wersja B pojemnika ma miejsce na identyfikator przewidziane w minimalnym wgłębieniu na jednej ze ścian zewnętrznych pojemnika. Dzięki takiemu rozwiązaniu umieszczenie transpondera jest znacznie łatwiejsze w porównaniu z wersją A, jednak usunięcie takiego identyfikatora RFID jest również znacznie łatwiejsze. Obydwa pojemniki zostały zaprojektowane tak, aby transponder RFID znajdował się w identycznej odległości od zewnętrznego obrysu pojemnika, jedyną różnicą pomiędzy nimi jest umieszczenie w wersji A dodatkowej cienkiej ścianki z materiału PET-G zakrywającej transponder RFID. Przeprowadzone pomiary wykazały, że zastosowanie dodatkowej ścianki, przesłaniającej identyfikator nie wpływa na efektywność identyfikacji obiektów.

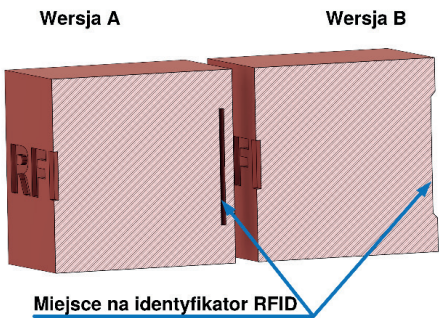
Wdrażając systemy oparte na technice RFID, producenci i przedsiębiorcy muszą przestrzegać standardów i norm obowiązujących w danym regionie, co jest szczególnie istotne przy planowaniu globalnych wdrożeń. Na przykład w Stanach Zjednoczonych nadzoruje je Federalna Komisja Łączności FCC (ang. *Federal Communications Commission*), natomiast w Unii Europejskiej – Europejski Instytut Norm Telekomunikacyjnych ETSI (ang. *European Telecommunications Standards Institute*). Różnice między standardami w USA i Europie dotyczą głównie pasm częstotliwości RFID UHF: w Europie urządzenia działają w zakresie 865–868 MHz, natomiast w USA pracują w zakresie 902–928 MHz. Przestrzeganie wymagań tych norm jest kluczowe dla kompatybilności i prawidłowego funkcjonowania systemów RFID w różnych regionach. RFID jest jednym z podstawowych narzędzi nowoczesnej gospodarki informacyjnej, znajdującym szerokie zastosowanie w przemyśle, logistyce oraz życiu codziennym. Dzięki możliwości szybkiego i jednoczesnego odczytu wielu



Rys. 2. Budowa transpondera RFID
Fig. 2. RFID transponder design

Tabela 1. Struktura danych w pamięci identyfikatora RFID
Table 1. Data structure in the memory of the RFID tag

Bank pamięci	Zakres	Funkcja
Reserved Memory	32–64 bity	Hasła zabezpieczające
EPC Memory	96–496 bitów	Kod produktu
TID Memory	96+ bitów	Identyfikator sprzętowy
User Memory (opcjonalna)	do kilku kB	Dodatkowe dane użytkownika



Rys. 3. Model pojemników na identyfikator RFID
Fig. 3. RFID tag box model

transponderów technologia ta rewolucjonizuje procesy identyfikacji i śledzenia obiektów, przyczyniając się do efektywnego zarządzania łańcuchem dostaw. W logistyce, transpondery RFID umieszczone na paletach i kontenerach usprawniają procesy logistyczne, nawet w trudnych warunkach atmosferycznych, a odpowiednie rozmieszczenie czytników i anten pozwala na automatyzację procesów inwentaryzacyjnych.

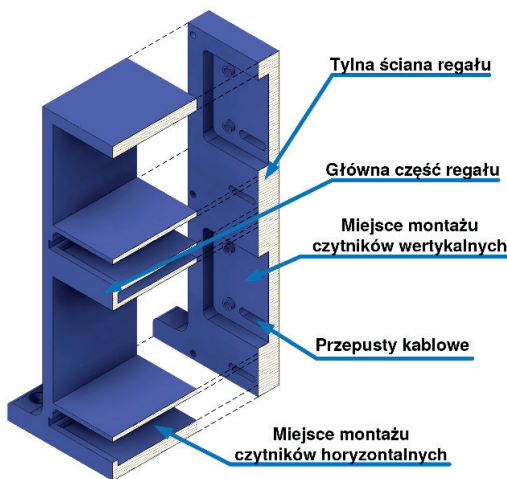
Technika RFID cieszy się coraz większym zainteresowaniem wśród dużych korporacji, które dostrzegają jej potencjał w automatyzacji i optymalizacji procesów przemysłowych. Firmy inwestują znaczne środki w badania nad RFID i wdrożenia testowe w swoich magazynach oraz fabrykach, aby lepiej zrozumieć i wykorzystać jej możliwości. RFID jest nieodłączną częścią czwartej rewolucji przemysłowej, znanej jako Przemysł 4.0, w szczególności w kontekście inteligentnych magazynów, gdzie integracja z Internetem Rzeczy (IoT) tworzy fundament dla przyszłych autonomicznych środowisk magazynowych. Połączenie RFID z systemami zarządzania magazynem (WMS) oraz

technologiami, takimi jak autonomiczne roboty mobilne (AMR) czy systemy wspierające decyzje (DSS), znacząco poprawia wydajność operacyjną i pozwala na bieżące śledzenie zasobów. Pomimo wysokich kosztów początkowych związanych z implementacją technologii Przemysłu 4.0, RFID umożliwia efektywniejsze zarządzanie zapasami, co przekłada się na redukcję kosztów operacyjnych oraz poprawę dokładności inwentaryzacji nawet o 30 %. RFID, wspierając również model cyfrowego bliźniaka i zintegrowane systemy monitorowania, pozwala na optymalizację logistyki i prognozowanie popytu, co zwiększa elastyczność i niezawodność nowoczesnych magazynów oraz całych łańcuchów dostaw.

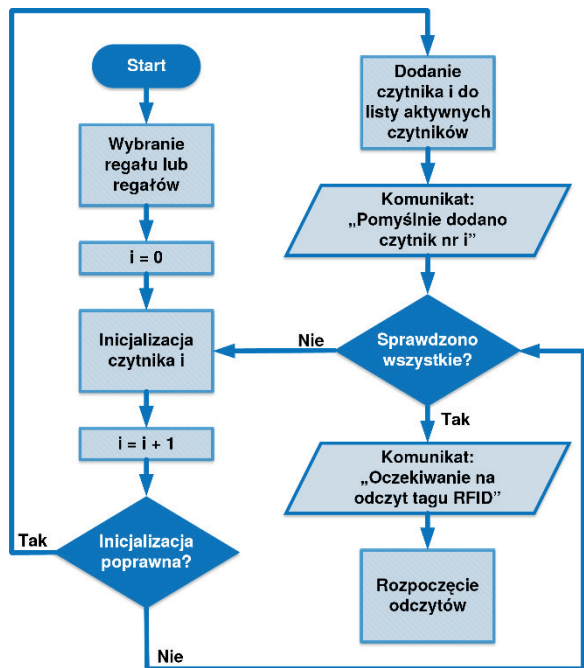
4. Odczytywanie identyfikatorów RFID

W makiecie służącej do pomiarów, mającej na celu odczyt identyfikatorów RFID, zastosowano liczne czytniki RFID PN532, które umieszczono na dwóch regałach. Użycie w makiecie całej macierzy czytników RFID ma na celu dokładne i bezbłędne identyfikowanie obiektów umieszczonych na półkach magazynowych. Ponadto przez wzgląd na bardzo dobrą znajomość lokalizacji każdego czytnika możliwe jest precyzyjne określenie lokalizacji danego produktu w rozproszonym środowisku magazynowym. Podczas odczytu operator uzyskuje nie tylko informację o odczytanym produkcie, ale dodatkowo numer ewidencyjny regału i czytnika, który wykrył dany identyfikator RFID. Na pierwszym regale moduły RFID zamontowano poziomo, bezpośrednio pod każdą półką regału. W celu zapewnienia jednakowych warunków w każdej części regału, do montażu czytników wykorzystano specjalnie zaprojektowane szuflady. Umożliwiają one stabilne przymocowanie czytnika, który następnie można wsunąć wraz z szufladą na właściwe miejsce. W drugiej wersji regału moduły PN532 zamontowano pionowo na tylnej ścianie. Podczas projektowania regału uwzględniono specjalne otwory montażowe, które pozwoliły na bezpośrednie przymocowanie czytników RFID do tylnej ściany. Wszystkie czytniki zaimplementowane w danym regale zostały podpięte to multiplexera I²C TCA9548A, który umożliwia obsługę do ośmiu podłączonych jednocześnie urządzeń.

Fragment modelu regału zaprezentowano na rysunku 4. Zaznaczono na nim dwa kluczowe elementy konstrukcyjne regału: główny stelaż z półkami i miejscem na szuflady oraz tylną ścianę, zaprojektowaną do pionowego montażu czytników RFID. Takie rozwiązanie umożliwia uniwersalne wykorzystanie modelu regału i umieszczenie na nim zarówno czytników montowanych horyzontalnie z wykorzystaniem specjalnych szuflad, jak i montaż czytników wertykalnie na tylnej ścianie.



Rys. 4. Model regału magazynowego
Fig. 4. Storage rack model



Rys. 5. Algorytm konfiguracji środowiska magazynowego
Fig. 5. Algorithm for configuring the storage environment

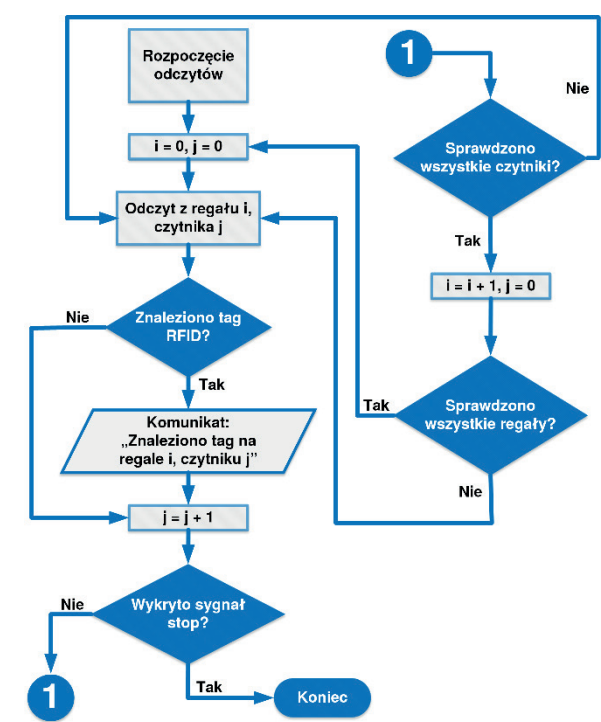
Implementacja algorytmu odczytywania identyfikatorów RFID do badań laboratoryjnych wymaga precyzyjnego zaplanowania środowiska testowego oraz odpowiedniego dostosowania sprzętu i oprogramowania, aby uzyskać dokładne i powtarzalne wyniki. Podczas wstępnych pomiarów użyto mikrokomputera Raspberry Pi jako jednostki operatorskiej oraz zestawu czytników RFID połączonych za pomocą multiplexerów, co umożliwia jednoczesną komunikację z wieloma czytnikami RFID. Na rysunku 5 przedstawiono sposób konfiguracji środowiska magazynowego składającego się z dowolnej liczby regałůw. Aby poprawnie zainicjalizować proces odczytu danych z obiektów wyposażonych w transponder RFID na wszystkich dostępnych regałach, konieczne jest ponowne przeprowadzenie tego procesu po każdorazowej zmianie konfiguracji. Podczas konfiguracji operator wprowadza liczbę regałůw w systemie, a następnie system podejmuje próbę nawiązania połączenia z każdym czytnikiem zainstalowanym na wskazanych regałach. W przypadku pomyślnego połączenia dany czytnik zostaje dodany do listy aktywnych urządzeń gotowych do pracy.

Algorytm odczytu działa w sposób ciągły, iterując przez wszystkie podłączone czytniki i rejestrując numery identyfikatorów w zasięgu każdego z nich. Na etapie konfiguracji algorytmu kluczowe było ustalenie parametrów związanych z odczytem i komunikacją, takich jak częstotliwość próbkowania i czas oczekiwania na odczyt. Zoptymalizowanie tych parametrów umożliwiło ograniczenie zakłóceń oraz maksymalne wykorzystanie zasięgu odczytu, co było istotne dla zapewnienia spójności wyników w warunkach laboratoryjnych. Opracowany algorytm komunikuje się z każdym czytnikiem w sposób sekwencyjny, na bieżąco rejestrując obecność identyfikatorów i zapisując ich numery seryjne do bazy danych, co pozwala na analizę zebranych danych w późniejszych etapach. Schemat działania algorytmu znajduje się na rys. 6.

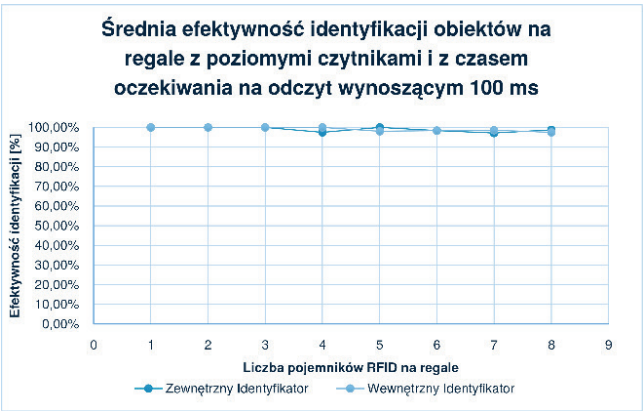
Laboratoryjna implementacja algorytmu odczytu RFID dostarczyła wstępnych wyników dotyczących wydajności systemu w różnych warunkach, uwzględniając odległość między identyfikatorem a czytnikiem, orientację identyfikatora oraz obecność ewentualnych przeszkód. Dzięki temu możliwe było uzyskanie charakterystyki działania RFID, co stanowi podstawę do optymalizacji tej technologii przed wdrożeniem w rzeczywistych środowiskach magazynowych.

Rezultatem wstępnych pomiarów było uzyskanie średniej efektywności identyfikacji na poziomie zbliżonym do 100 % pod warunkiem odpowiedniego umieszczania obiektów z transponderem RFID na regale. Wykres porównawczy dla tych pomiarów z uwzględnieniem dwóch wersji pojemników z identyfikatorem RFID został przedstawiony na rys. 7.

Zaproponowana idea zastosowania macierzy czytników RFID rozmieszczonych na regale w ściśle określonym schemacie jest kluczowa do prawidłowego działania systemu identyfikacji. Znajomość precyzyjnego rozmieszczenia poszczególnych czytników oraz dostęp do informacji na temat transponderów wykrytych przez dany czytnik umożliwiającą szybką lokalizację wykrytego towaru z zaimplementowanym identyfikatorem RFID w rozproszonym środowisku magazynowym. Do precyzyjnego zlokalizowania towarów wystarczy odczyt z trzech czytników, które podczas danego pomiaru jednocześnie wykryły ten sam transponder. Taka sytuacja umożliwia określenie z dużą dozą prawdopodobieństwa dokładnej półki regału, na której znajduje się poszukiwany produkt. Z pewnością towar ten znajduje się na półce, do której przymocowany jest czytnik RFID, który podczas tego pomiaru wykrył dany identyfikator. Znajomość



Rys. 6. Schemat algorytmu odczytującego transpondery RFID
 Fig. 6. The algorithm used to read RFID transponders



Rys. 7. Wykres średniej efektywności identyfikacji
 Fig. 7. Average identification efficiency chart

grupy czytników, które wykryły transponder RFID sama w sobie pozwala na przybliżone określenie lokalizacji tego produktu w magazynie, jednak brakuje w takim przypadku informacji na temat dokładnej półki, na której umieszczony jest poszukiwany produkt. W przypadku, gdy takowy system zaimplementowany jest w wielopoziomowych magazynach informacja ta jest niezwykle istotna, gdyż pozwala zawczasu przewidzieć jaki sprzęt jest niezbędny do przeniesienia danego towaru. W zależności od poziomu, na którym umieszczony jest poszukiwany produkt, w niektórych przypadkach, wystarczy sam operator bez specjalistycznego sprzętu.

Opracowany system charakteryzuje się dodatkowo łatwą skalowalnością, gdyż każdy regał podłączony do systemu jest osobnym bytem, który zarządza wszystkimi czytnikami na nim umieszczonymi. Z założenia systemu możliwe jest podłączenie do całości licznych regałów, co jest istotnym aspektem w przypadku systemów zarządzania nowoczesnymi oraz semi-autonomicznymi środowiskami magazynowymi.

5. Podsumowanie

Technika RFID ma ogromny potencjał rozwoju w najbliższej przyszłości, zwłaszcza w kontekście automatyzacji i digitalizacji procesów przemysłowych oraz logistycznych. W środowisku Przemysłu 4.0 technika RFID pełni kluczową rolę, umożliwiając tworzenie inteligentnych magazynów, gdzie towary są identyfikowane, śledzone i zarządzane w sposób autonomiczny. Technika RFID jest odpowiednim narzędziem do szybkiego i precyzyjnego gromadzenia danych lokalizacyjnych. Połączenie RFID z Internetem Rzeczy (IoT) oraz systemami sztucznej inteligencji pozwala na bieżącą analizę danych i podejmowanie decyzji operacyjnych w czasie rzeczywistym, co znacznie zwiększa efektywność zarządzania łańcuchem dostaw. Zgromadzone dane lokalizacyjne to doskonały zbiór informacji, które mogą zostać użyte do uczenia sieci neuronowych, aby z czasem wykorzystać pełen potencjał sztucznej inteligencji do szybkiego reagowania na błędy operacyjne [19]. Takie podejście będzie stopniowo zwiększało ogólną efektywność operacyjną w inteligentnych magazynach oraz zmniejszało częstotliwość występowania błędów operacyjnych. W przyszłości RFID może stać się fundamentem systemów zarządzania zapasami, eliminując ręczne procesy, minimalizując błędy i zwiększając przejrzystość na każdym etapie łańcucha dostaw. Technologia ta ma również potencjał do pełnej integracji z modelami cyfrowego bliźniaka, co umożliwi tworzenie wirtualnych kopii magazynów i przeprowadzanie symulacji procesów logistycznych, takich jak optymalizacja transportu i zarządzanie przestrzenią magazynową.

Zasięg oraz skuteczność wymiany informacji z wykorzystaniem techniki RFID zależą od wielu czynników, takich jak rodzaj transpondera (pasywny lub aktywny), częstotliwość pracy systemu oraz konfiguracja anteny. Dzięki wszechstronności i możliwości dostosowania do różnych warunków RFID ma potencjał, aby stać się podstawową technologią identyfikacji i śledzenia obiektów w nowoczesnym przemyśle.

Bibliografia

- van Geest M., Tekinerdogan B., Catal C., *Smart Warehouses: Rationale, Challenges and Solution Directions*, “Applied Sciences”, Vol. 12, No. 1, 2022, DOI: 10.3390/app12010219.
- Tikwayo L.N., Mathaba T.N.D., *Applications of Industry 4.0 Technologies in Warehouse Management: A Systematic Literature Review*, “Logistics”, Vol. 7, No. 2, 2023, DOI: 10.3390/logistics7020024.

3. Jarašūnienė A., Čižiūnienė K., Čereška A., *Research on Impact of IoT on Warehouse Management*, "Sensors", Vol. 23, No. 4, 2023, DOI: 10.3390/s23042213.
4. Mashayekhy Y., Babaei A., Yuan X.-M., Xue A., *Impact of Internet of Things (IoT) on Inventory Management: A Literature Survey*, "Logistics", Vol. 6, No. 2, 2022, DOI: 10.3390/logistics6020033.
5. Khan M.G., Huda N.U., Zaman U.K.U., *Smart Warehouse Management System: Architecture, Real-Time Implementation and Prototype Design*, "Machines", Vol. 10, No. 2, 2022, DOI: 10.3390/machines10020150.
6. Tang Y.-M., Ho G.T.S., Lau Y.-Y., Tsui S.-Y., *Integrated Smart Warehouse and Manufacturing Management with Demand Forecasting in Small-Scale Cyclical Industries*, "Machines", Vol. 10, No. 6, 2022, 472. DOI: 10.3390/machines10060472.
7. Menanno M., Savino M.M., Accorsi R., *Digitalization of Fresh Chestnut Fruit Supply Chain through RFID: Evidence, Benefits and Managerial Implications*, "Applied Sciences", Vol. 13, No. 8, 2023, DOI: 10.3390/app13085086.
8. Sabbaghi A., Vaidyanathan G., *Effectiveness and Efficiency of RFID technology in Supply Chain Management: Strategic values and Challenges*, "Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research", Vol. 3, No. 2, 2008, 71–81, DOI: 10.4067/S0718-18762008000100007.
9. Varriale V., Cammarano A., Michelino F., Caputo M., *Sustainable Supply Chains with Blockchain, IoT and RFID: A Simulation on Order Management*, "Sustainability", Vol. 13, No. 11, 2021, DOI: 10.3390/su13116372.
10. Unhelkar B., Joshi S., Sharma M., Prakash S., Mani A.K., Prasad M., *Enhancing supply chain performance using RFID technology and decision support systems in the industry 4.0 – A systematic literature review*, "International Journal of Information Management Data Insights", Vol. 2, No. 2, 2022, DOI: 10.1016/j.ijime.2022.100084.
11. Zhao J., Xue F., Li D., *Intelligent Management of Chemical Warehouses with RFID Systems*, "Sensors", Vol. 20, No. 1, 2020, DOI: 10.3390/s20010123.
12. Kang Y.-S., Kim H., Lee Y.-H., *Implementation of an RFID-Based Sequencing-Error-Proofing System for Automotive Manufacturing Logistics*, "Applied Sciences", Vol. 8, No. 1, 2018, DOI: 10.3390/app8010109.
13. Rácz-Szabó A., Ruppert T., Bántay L., Löcklin A., Jakab L., Abonyi J., *Real-Time Locating System in Production Management*, "Sensors", Vol. 20, No. 23, 2020, DOI: 10.3390/s20236766.
14. Kubáňová J., Kubasáková I., Čulík K., Štítik L., *Implementation of Barcode Technology to Logistics Processes of a Company*, "Sustainability", Vol. 14, No. 2, 2022, DOI: 10.3390/su14020790.
15. Osman M.K., Mohamad E., Husain R., Kamarudin N., *Evaluating the Importance of Radio Frequency Identification (RFID) in Warehouse Operations for Army Supply Readiness*, "International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences", Vol. 14, No. 10, 2024, 521–538, DOI: 10.6007/IJARBS/v14-i10/23121.
16. Maleshkov V., Valchanov H., Aleksieva V., *Blockchain-Based Model for Warehouse Management Systems for Artworks and Collectibles*, "Engineering Proceedings", Vol. 70, No. 1, 2024, DOI: 10.3390/engproc2024070039.
17. He Z., Jiang W., *A new belief Markov chain model and its application in inventory prediction*, "International Journal of Production Research", Vol. 56, No. 8, 2017, 2800–2817, DOI: 10.1080/00207543.2017.1405166.
18. Talib F., Asjad M., Attri R., Siddiquee A.N., Khan Z.A., *A road map for the implementation of integrated JIT-lean practices in Indian manufacturing industries using the best-worst method approach*, "Journal of Industrial and Production Engineering", Vol. 37, No. 6, 2020, 275–291, DOI: 10.1080/21681015.2020.1788656.
19. Peng C., Jiang H., Qu L., *Deep convolutional neural network for passive RFID tag localization via joint RSSI and PDOA fingerprint features*, "IEEE Access", Vol. 9, 2021, 15441–15451, DOI: 10.1109/access.2021.3052567.

Efficiency of Goods Identification in Warehouses Using RFID Technology

Abstract: RFID technology has a crucial role to fulfill in the automation of logistics processes, providing fast and contactless identification of goods in distributed warehouse environments. The article examines the concept of research on the effectiveness of this technology, focusing on the reading speed and efficiency of RFID readers themselves under different operational conditions. Most attention was granted to the performance of RFID systems dependent on both device design and environmental factors such as humidity, tag obscuration and antenna placement. Preliminary measurements confirm that optimal RFID implementation can significantly increase the efficiency of inventory management and simultaneously minimize identification errors, making the technology indispensable in logistics and warehouse management.

Keywords: RFID, smart warehouse, identification efficiency, Industry 4.0, IoT

mgr inż. Karol Siwiec

k.siwiec@prz.edu.pl

ORCID: 0009-0003-6654-5812

Asystent w Zakładzie Systemów Złożonych Politechniki Rzeszowskiej. Jego zainteresowania naukowe obejmują Internet Rzeczy oraz systemy identyfikacji bezstykowej RFID, a także ich praktyczne zastosowania w edukacji, przemyśle i koncepcji inteligentnych miast (smart city).



mgr inż. Michał Ćmil

m.cmil@prz.edu.pl

ORCID: 0000-0002-5941-4385

Asystent w Zakładzie Systemów Złożonych Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się m.in. problematyką systemów złożonych oraz sieci i systemów komputerowych.



dr inż. Andrzej Paszkiewicz

andrzejp@prz.edu.pl

ORCID: 0000-0001-7573-3856

Adiunkt w Zakładzie Systemów Złożonych Politechniki Rzeszowskiej. Stopień doktora nauk technicznych w zakresie informatyki uzyskał w 2009 r. na Politechnice Łódzkiej. Autor około 100 publikacji w krajowych i międzynarodowych czasopiśmie naukowych i materiałach konferencyjnych. Organizował warsztaty i konferencje z zakresu sieci komputerowych, inżynierii oprogramowania oraz Przemysłu 4.0. Jego zainteresowania badawcze skupiają się na procesach zachodzących w strukturach sieciowych, VR/AR, a także na rozwoju technologii dla przemysłu.



dr inż. Bartosz Pawłowicz

barpaw@prz.edu.pl

ORCID: 0000-0001-9469-2754

Adiunkt w Katedrze Systemów Elektronicznych i Telekomunikacyjnych Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. Doktorat w dyscyplinie telekomunikacja uzyskał na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH w Krakowie w 2012 r. Jego główne badania dotyczą systemów identyfikacji bezstykowej RFID i ich zastosowań.



Łukasz Pachla

177135@stud.prz.edu.pl

ORCID: 0009-0001-1256-3041

Student kierunku informatyki na Politechnice Rzeszowskiej, w specjalności inżynierii systemów informatycznych. Jego zainteresowania koncentrują się na rozwoju silników graficznych, w szczególności Unreal Engine 5, oraz na zagadnieniach związanych ze sztuczną inteligencją i ich praktycznym zastosowaniu.

