

Zautomatyzowane testowanie poprawności procesu na linii produkcyjnej w oparciu o technikę RFID

Bartosz Pawłowicz, Arkadiusz Stęchły, Bartosz Trybus, Adrian Kosior

Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Wincentego Pola 2, 35-021 Rzeszów

Marek Ruman

Elcont sp. z o.o. Trzebownisko 928c, 36-001 Trzebownisko

Streszczenie: Technika RFID pozwala na zautomatyzowanie procesów produkcyjnych, szczególnie w zakresie kontroli jakości, zarządzaniu zasobami i optymalizacji produkcji. W ramach przedstawionego rozwiązania zaprojektowany i skonstruowany został model laboratoryjny linii produkcyjnej, w którym zastosowano identyfikatory RFID do identyfikacji poprawności obróbki komponentu na różnych etapach przetwarzania oraz jego ostatecznego sortowania. Wyniki testów potwierdzają skuteczność systemu w klasyfikacji produktów oraz wskazują na wpływ orientacji i odległości pomiędzy identyfikatorami a czytnikami na wydajność systemu.

Słowa kluczowe: RFID, automatyzacja produkcji, kontrola jakości, Przemysł 4.0

1. Wprowadzenie

Identyfikacja obiektów odgrywa kluczową rolę w dzisiejszych czasach, wpływając na wiele aspektów codziennego życia. Jej znaczenie jest szczególnie zauważalne w takich obszarach jak logistyka, handel detaliczny, usługi magazynowe oraz identyfikacja narzędzi, komponentów i półproduktów w przemyśle [1–4]. W logistyce skuteczna identyfikacja produktów jest niezbędna do zarządzania łańcuchem dostaw, śledzenia przesyłek i zapewnienia, że towary dotrą do miejsca przeznaczenia na czas [5–8]. W sektorze handlu detalicznego, zarówno tradycyjnego, jak i internetowego, identyfikacja produktu umożliwia szybkie skanowanie przy kasie, ułatwia zarządzanie zapasami i wspiera proces reklamacji [2]. Usługi magazynowe opierają się na precyzyjnej identyfikacji produktów [4] w celu optymalizacji przestrzeni magazynowej, monitorowania poziomów zapasów i minimalizowania ryzyka błędów w realizacji zamówień [9, 10]. W przemyśle identyfikacja narzędzi, komponentów i półproduktów ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia ciągłości produkcji i jakości produktów końcowych. Pozwala na śledzenie historii i pochodzenia każdego elementu, co jest szczególnie ważne w sektorach takich jak motoryzacja, lotnictwo czy elektronika, gdzie kontrola jakości i bezpieczeństwo są kluczowe

[10]. Innym działem gospodarki, który wymaga wysokiej klasy kontroli jakości oraz bezpieczeństwa jest przemysł spożywczy. Również w nim technika RFID znalazła swoje zastosowanie, zarówno w śledzeniu [11] produktów, jak i ich monitorowaniu [12]. W branży medycznej RFID znalazło podobne zastosowanie, śledzenie i monitorowanie leków, produktów czy próbek badawczych [13], ale w połączeniu z systemami IoT, pozwala na analizowanie i badanie stanu zdrowia i bezpieczeństwa pacjentów [14].

Obecnie procesy identyfikacji są najczęściej przeprowadzane przy użyciu systemów bezstykowych, co oznacza, że nie wymagają fizycznego kontaktu między urządzeniem a identyfikowanym obiektem. Przykładami takich rozwiązań są techniki odczytu kodów graficznych, w tym kodów kreskowych i kodów QR, a także technika RFID (ang. *Radio Frequency Identification*). Kody kreskowe są szeroko stosowane w handlu detalicznym, logistyce i produkcji. Kody QR mogą przechowywać większe ilości informacji i są często wykorzystywane w marketingu, identyfikacji produktów i płatnościach mobilnych [15, 16]. Systemy RFID są stosowane w zautomatyzowanych procesach w różnych sektorach [17]. Trwające badania koncentrują się między innymi na urządzeniach Internetu rzeczy (IoT) [18–20]. Zastosowanie identyfikacji RFID w procesach przemysłowych i produkcyjnych może obejmować logistykę narzędzi, komponentów i półproduktów w zrobotyzowanych, jak i drukowanych w technice 3D, procesach produkcyjnych [21–24].

Celem artykułu jest przedstawienie wykorzystania technologii RFID do inteligentnego nadzoru jakości produkowanych komponentów na linii produkcyjnej. Proponowane rozwiązanie może być zastosowane w zautomatyzowanych systemach, w których maszyny wykorzystują dane przechowywane w identyfikatorach RFID do zarządzania przetwarzaniem półproduktów na linii produkcyjnej. Komponent poddawany obróbce na kilku stacjach jest sprawdzany pod kątem jakości i poprawności po każdym etapie

Autor korespondujący:

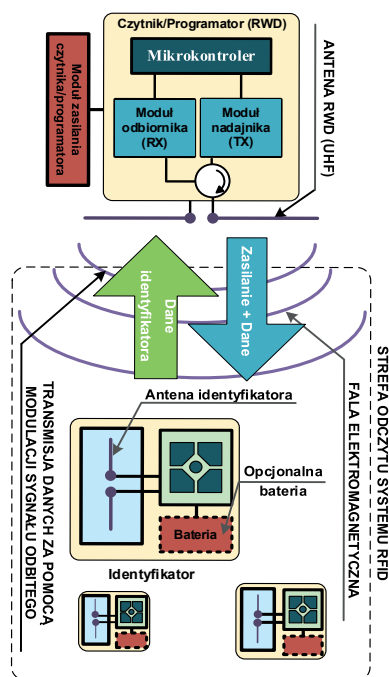
Arkadiusz Stęchły, a.stechly@prz.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 18.11.2024 r., przyjęty do druku 08.04.2025 r.



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



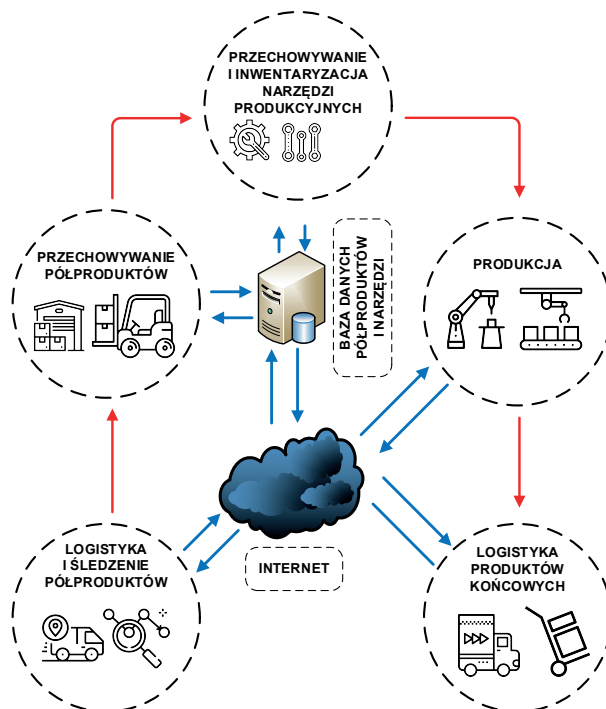
Rys. 1. Ogólny schemat blokowy systemu RFID
Fig. 1. General block diagram of an RFID system

przetwarzania. Wyniki testów są zapisywane w identyfikatorze umieszczonym w bazie technologicznej przetwarzanego komponentu. Na podstawie pozytywnego lub negatywnego wyniku pracy poprzedniej stacji każda kolejna stacja zdecyduje, czy rozpocząć przetwarzanie, czy też usunąć wadliwą część bez kontynuowania dalszej produkcji. W połączeniu z obecnym wykorzystaniem technologii RFID do identyfikacji obiektów i śledzenia ścieżki przebytej przez komponenty, proponowane rozwiązanie poprawi jakość produkowanych towarów i przyspieszy wykrywanie wad. Dodatkowo przeprowadzono badania mające na celu przedstawienie prędkości zapisu i odczytu systemu w zależności od różnych odległości i kątach położenia identyfikatorów, a także wpływ liczby bloków danych na czas zapisu i odczytu identyfikatorów RFID.

2. Zastosowanie RFID w produkcji i przetwórstwie

Istnieje powszechna świadomość korzyści, jakie identyfikacja radiowa (RFID) może przynieść łańcuchowi dostaw i procesom produkcyjnym (rys. 2). Na obecnym etapie rozwoju technika RFID jest wykorzystywana w wielu zadaniach związanych z produkcją towarów, w tym w zakresie bezpieczeństwa, kontroli jakości, realizacji produkcji i zarządzania zasobami. W przemyśle zazwyczaj wypełnia lukę między systemami zarządzania produkcją (MES), systemami planowania zasobów przedsiębiorstwa (ERP) a halą produkcyjną. Technologia ta umożliwia dostarczanie danych pomocniczych ze znacznie większą dokładnością i szczegółowością niż poprzednie rozwiązania.

Typowy system RFID składa się z urządzenia odczytu/zapisu (RWD) wyposażonego w co najmniej jedną antenę i co najmniej jeden identyfikator, który zawiera obwód anteny, mikroprocesor i pamięć (rys. 1) [25]. Numer seryjny identyfikatora i dane dotyczące zidentyfikowanego obiektu są zazwyczaj przechowywane w jego zintegrowanej pamięci. RWD odczytuje dane z pamięci identyfikatora RFID, a pobrane dane są zwykle przesyłane do nadrzędnego sprzętu i oprogramowania. Jedną z funkcji RWD może być również zapisywanie danych w pamięci identyfika-



Rys. 2. Idea wykorzystania systemów identyfikacji RFID w przemyśle
Fig. 2. Concept of using RFID identification systems in industry

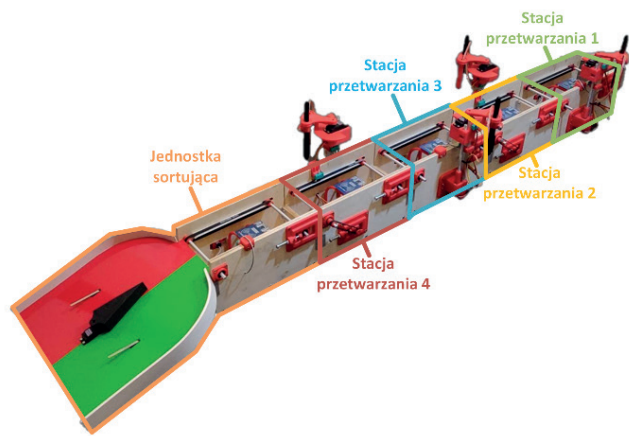
tora, gdy jest to konieczne, umożliwiając aktualizację zawartości pamięci na różnych etapach cyklu życia zidentyfikowanego obiektu. W tym opracowaniu termin „czytnik” będzie odnosił się do urządzenia, które ma zarówno możliwości odczytu, jak i zapisu.

Najpopularniejszy typ identyfikatora RFID, znany jako pasywny, zawiera tylko chip z obwodem anteny. Identyfikatory półpasywne mają zazwyczaj dodatkowe źródło zasilania dla chipa, wykorzystujące system zbierania energii do pobierania energii z otoczenia. Ta funkcja pomaga rozszerzyć obszar, w którym może nastąpić wymiana danych. Ponadto w niektórych nowych systemach dodatkowa energia jest wykorzystywana do zasilania wyspecjalizowanych autonomicznych bloków funkcyjnych, takich jak pomiar wielkości fizycznych (np. wilgotności, temperatury, natężenia światła, ciśnienia, przyspieszenia, gazu itp.), przechowywanie zebranych danych w pamięci oraz monitorowanie aktywności i dystrybucji mocy. Te autonomiczne funkcje nie wymagają zaangażowania RWD. Jednak RWD nadal jest niezbędny do odczytu takich danych z identyfikatora.

Systemy RFID znalazły zastosowanie w sterowaniu różnymi aspektami bezpieczeństwa na halach produkcyjnych. Na przykład, identyfikatory RFID przypisane do personelu eliminują potrzebę stosowania haseł do kontrolowania procesu produkcyjnego i modyfikowania parametrów. Wykorzystując identyfikatory RFID, dostęp do stref bezpieczeństwa i maszyn może być ograniczony do autoryzowanego i odpowiednio wykwalifikowanego personelu odpowiedzialnego za zadania takie jak obsługa lub konserwacja linii technologicznych. Dodatkowo umożliwia to monitorowanie zadań przydzielonych i wykonanych przez pracowników.

3. Tworzenie linii produkcyjnej opartej na RFID

Prezentacja proponowanego rozwiązania obejmowała opracowanie laboratoryjnego modelu linii produkcyjnej, składającej się z czterech stacji przetwarzania i testowania i jednostki sortującej (rys. 3). Wszystkie elementy zostały skonstruowane

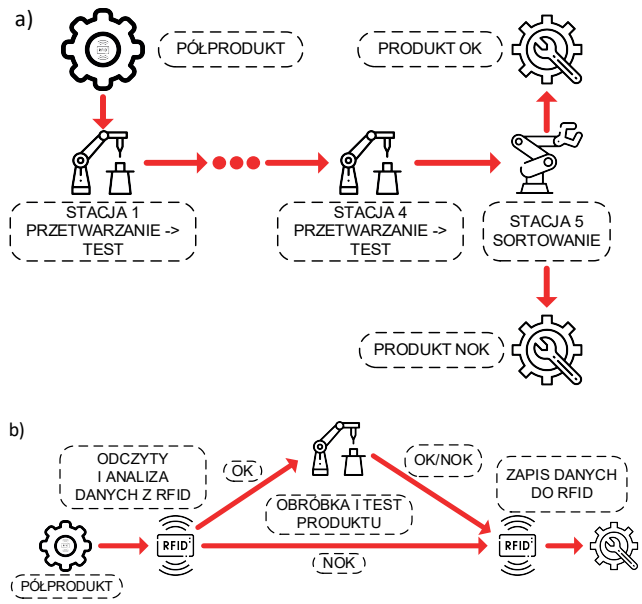


Rys. 3. Linia produkcyjna ze stacjami przetwarzania i testowania oraz jednostką sortującą
Fig. 3. Production line with processing and testing stations, and a sorting unit

modułowo, co pozwala na łatwy demontaż komponentów systemu. Każda stacja jest wyposażona w czytniki/programatory RFID i komponenty niezbędne do procesu produkcji i testowania, takie jak czujniki położenia stacji i elementu, serwomechanizmy, silniki napędowe i czujniki do weryfikacji dokładności przetwarzania. Jednostka sortująca jest wyposażona w czytnik RFID, serwomechanizmy do pozycjonowania przedmiotów, czujniki położenia i silniki napędowe.

Sterowanie procesem odbywa się za pomocą mikrokontrolerów Arduino. Dane produkcyjne są rejestrowane w celu śledzenia całkowitej liczby wyprodukowanych elementów, a także liczby prawidłowo i nieprawidłowo przetworzonych produktów. System przesyła te informacje do operatora za pośrednictwem portu szeregowego podłączonego do komputera i jednostki sortującej. Zamierzony przebieg pracy modelu został przedstawiony na rysunku 4a.

Rysunek 4b ilustruje przebieg pracy pojedynczej stacji przetwarzania. Proces rozpoczyna się od odczytu danych z identyfikatorów RFID osadzonego w bazie technologicznej komponentu.

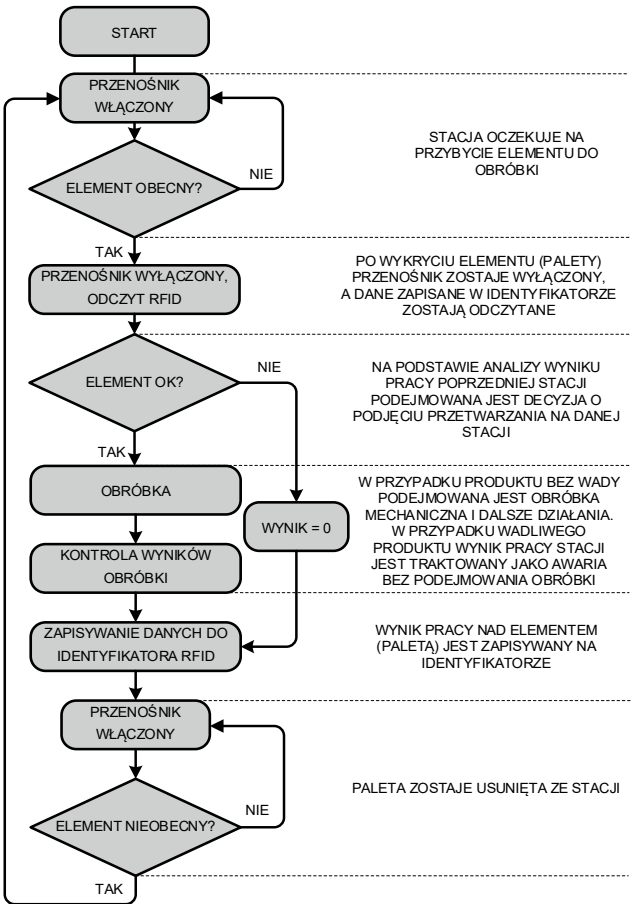


Rys. 4. a) Schemat linii produkcyjnej ze stacjami przetwarzania i testowania oraz jednostką sortującą, b) Operacyjny przebieg pracy dla stacji przetwarzania i testowania
Fig. 4. a) Production line diagram with processing and testing stations, and a sorting unit, b) Operational workflow for the processing and testing station

Jeśli dane wskazują, że przetwarzanie może być kontynuowane, stacja rozpoczyna oznaczanie komponentu czarnym markerem, przymocowanego do ruchomej kolumny, która obniża się, aby zetknąć się z komponentem, w wyznaczonym obszarze, symulując przetwarzanie elementu. Po zakończeniu procesu komponent jest testowany za pomocą czujnika koloru w celu zweryfikowania obecności czarnego znaku. Wynik testu jest zapisywany w identyfikatorze RFID. Jeśli poprzednia stacja zarejestrowała negatywny wynik testu, dalsza obróbka nie jest przeprowadzana, a komponent jest transportowany dalej. W pełni przetworzony produkt to biały plastikowy kwadrat z czterema czarnymi znakami, po jednym w każdym rogu elementu. Gdy wszystkie cztery stacje zakończą swoje zadania, produkt zatrzymuje się na stacji sortowania. Jednostka sortująca odczytuje dane z identyfikatora RFID i określa kierunek dalszego transportu, odrzucając wadliwe produkty. Historia przetwarzania, przechowywana w identyfikatorze RFID, pozwala systemowi sklasyfikować produkt jako prawidłowo przetworzony (OK) lub wadliwy (NOK) i przetransportować go do odpowiedniego obszaru końcowego.

Urządzenia sterujące stacjami nie muszą się ze sobą komunikować, ponieważ decyzje o rozpoczęciu przetwarzania są podejmowane wyłącznie na podstawie danych odczytanych z identyfikatora RFID wbudowanego w podstawę technologiczną produktu.

Program sterowania dla stacji jest oparty na ogólnym schemacie blokowym przedstawionym na rys. 5. Po uruchomieniu przenośnik jest aktywowany i zatrzymuje się, gdy paleta z komponentem dotrze do stacji. Po wykryciu detalu czytnik RFID komunikuje się z identyfikatorem w podstawie elementu, aby pobrać zapisane dane. Na podstawie tych danych podejmowana jest decyzja, czy kontynuować przetwarzanie. Jeśli komponent jest już wadliwy, dalsza praca nie jest wykonywana, a odpowiednie informacje są zapisywane w identyfikatorze RFID. Jeśli kom-



Rys. 5. Schemat blokowy działania stacji przetwarzania i testowania
Fig. 5. Block diagram of the operation of the processing and testing station

ponent jest wolny od wad, przeprowadzane jest przetwarzanie i związane z nim testy. Następnie komponent jest usuwany ze stacji. Szczegóły komponentu są zapisywane w bloku pamięci identyfikatora RFID. Każda stacja robocza weryfikuje wynik pracy poprzedniej stacji, a wynik jest przechowywany w pamięci identyfikatora RFID wraz z historią z poprzednich stacji.

Przebieg procesu znakowania przedstawiono na rys. 6. Kolumna technologiczna jest podnoszona do górnego położenia, które jest wykrywane przez wyłącznik krańcowy. Następnie ramię serwomechanizmu jest odpowiednio ustawiane w celu wykonania znakowania, gdzie zostaje opuszczane. Proces kończy się podniesieniem kolumny z powrotem do jej górnego pozycji.

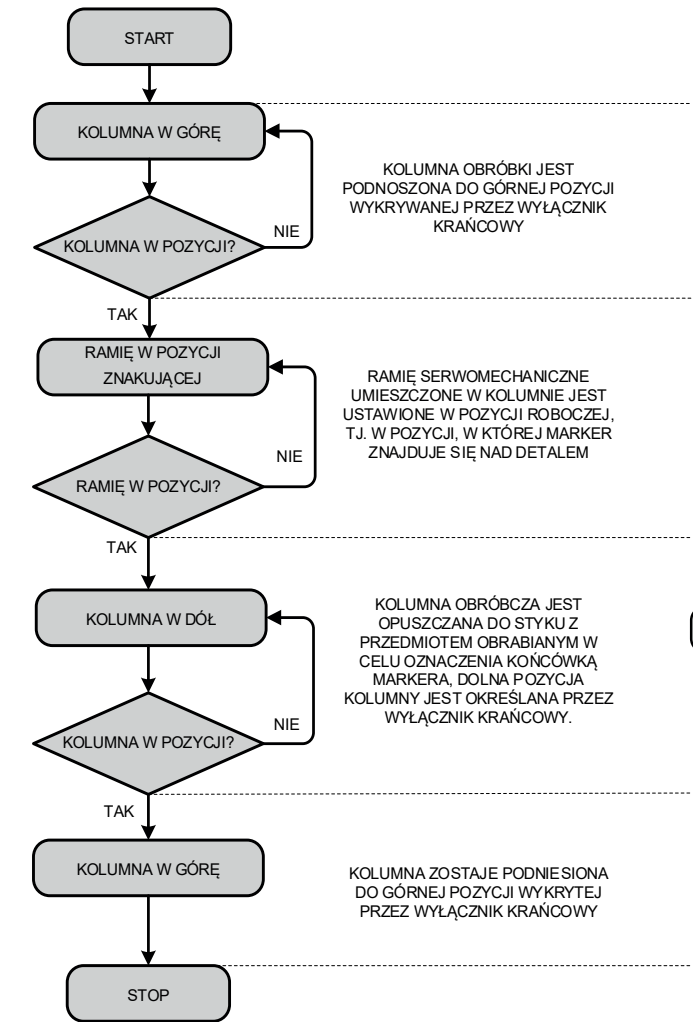
Proces testowania (rys. 7) polega na ustawieniu ramienia serwomechanizmu tak, aby czujnik znajdował się nad miejscem, w którym wcześniej naniesiono marker. Kolumna jest następnie opuszczana, a czujnik odczytuje kolor w określonej lokalizacji. Wykrycie koloru czarnego potwierdza, że obróbka elementu przebiega pomyślnie. Jeśli czujnik wykryje jakikolwiek inny kolor (np. biały), oznacza to błąd w działaniu stacji. Proces kończy się podniesieniem kolumny do górnej pozycji i powrotem ramienia do pozycji wyjściowej.

Ze względu na identyczne działanie każdej stacji, na wszystkich stacjach działa jeden program, różniący się tylko jedną zmienną – numerem stacji. Każda stacja wprowadza wynik swojej pracy do identyfikatora RFID, gdzie wartość 1 oznacza sukces, a 0 oznacza niepowodzenie. W tabeli 1 przedstawiono różne kombinacje wyników, które mogą zostać zapisane na każdej stacji.

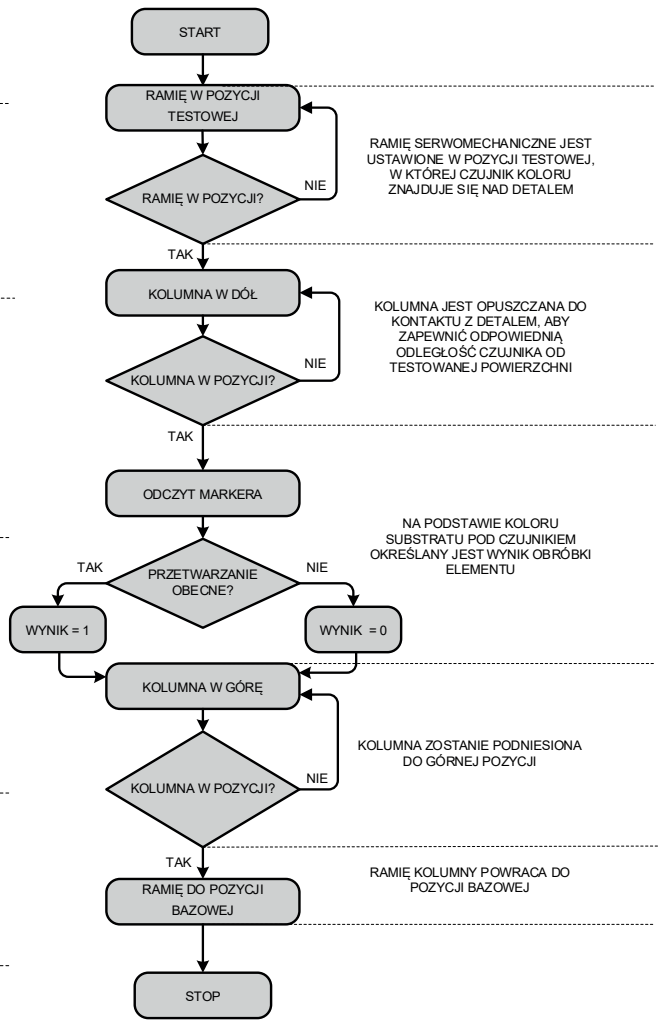
Tab. 1. Możliwe wyniki pracy dla stacji
Tab. 1. Possible Work Outcomes for Station

Stacja	1	2	3	4
Rezultat pracy	0	0	0	0
	1	0	0	0
	1	1	0	0
	1	1	1	0
	1	1	1	1

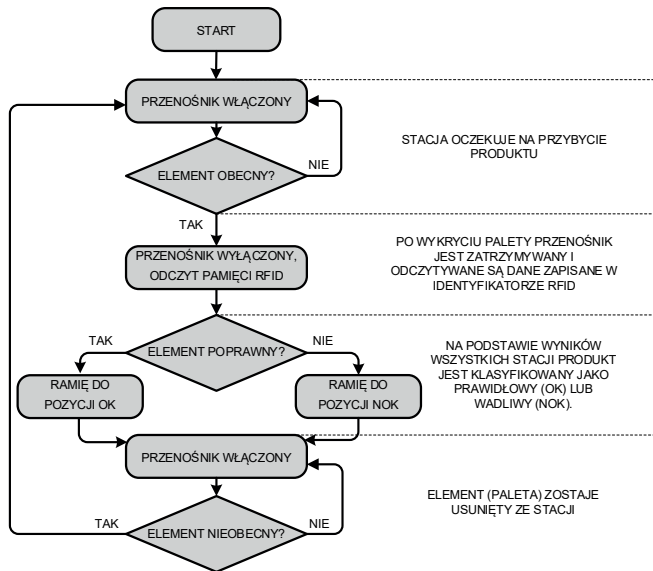
Schemat blokowy działania jednostki sortującej przedstawiono na rys. 8. Gdy element zostanie wykryty przez wyłącznik krańcowy, zatrzymuje się w stacji. Kolejny krok polega na odczycie danych zapisanych w identyfikatorze RFID. Analiza tych danych pozwala na wykrycie nieprawidłowości w działaniu poszczególnych stacji przetwarzania oraz klasyfikację produktów na podstawie poprawności wykonanej obróbki. Na podstawie tych informacji produkt jest klasyfikowany jako OK lub NOK. Następnie serwomechanizm jest pozycjonowany w odpowiedni sposób, tworząc ścieżkę wyladunku elementu do odpowiedniej strefy. Po aktywacji transportera paleta jest przenoszona do wyznaczonej strefy.



Rys. 6. Schemat blokowy procesu przetwarzania
Fig. 6. Processing block diagram



Rys. 7. Schemat blokowy procesu testowania
Fig. 7. Block diagram of the testing process



Rys. 8. Schemat blokowy działania stacji sortowania
Fig. 8. Block diagram of the sorting station operation

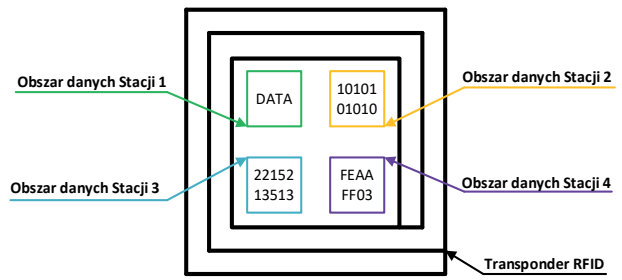
4. Testowanie systemu produkcyjnego opartego na RFID

Działanie modelu linii technologicznej zostało przetestowane w różnych wariantach pracy. W tym celu przygotowano pięć nieobrobionych elementów, aby zademonstrować funkcjonalność systemu. Prawdłowo przetworzona część powinna mieć cztery widoczne oznaczenia wykonane przez marker i powinna ostatecznie trafić do zielonej strefy sortera. Inne możliwe wyniki powinny zawierać nie więcej niż trzy oznaczenia i powinny zostać umieszczone w czerwonej strefie sortera (NOK). Takie wyniki potwierdziłyby pełną funkcjonalność modelu. Oczekiwane lokalizacje oznaczeń pokazano na rys. 9.

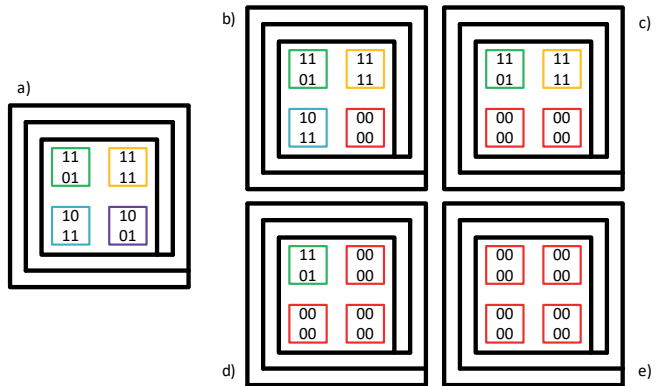
Pierwszy test polegał na uruchomieniu systemu z prawidłowo ustawionymi markerami. Nieobrobiona część umieszczona w przygotowanej bazie technologicznej została włożona na przenośnik pierwszej stacji. Stacja poprawnie przetworzyła część, sprawdziła wynik i zapisała dane w identyfikatorze RFID. Każda kolejna stacja oznaczała część w wyznaczonym obszarze, weryfikowała operację i przekazywała ją dalej. Po dotarciu do stacji sortującej część miała cztery prawidłowe oznaczenia i została sklasyfikowana jako prawidłowy produkt (OK), zgodnie z oczekiwaniami.

Celem kolejnych testów była weryfikacja działania modelu w przypadku awarii na każdej ze stacji obróbczych. Przed umieszczeniem nowych części na linii, markery były pojedynczo usuwane z każdej stacji. Po usunięciu markera na czwartej stacji część powinna być oznaczona w trzech miejscach i przejść do czerwonej strefy. Tej samej sytuacji oczekiwano po usunięciu znaczników na trzeciej, drugiej i pierwszej stacji, gdzie znalazłoby się kolejno dwa, jeden i zero oznaczeń. Testy były zgodne z oczekiwaniami. Każda z czterech części została sklasyfikowana jako wadliwa (NOK) i została skierowana do czerwonej strefy sortera. Na rys. 10 przedstawiono produkty końcowe ze scenariuszy testowych.

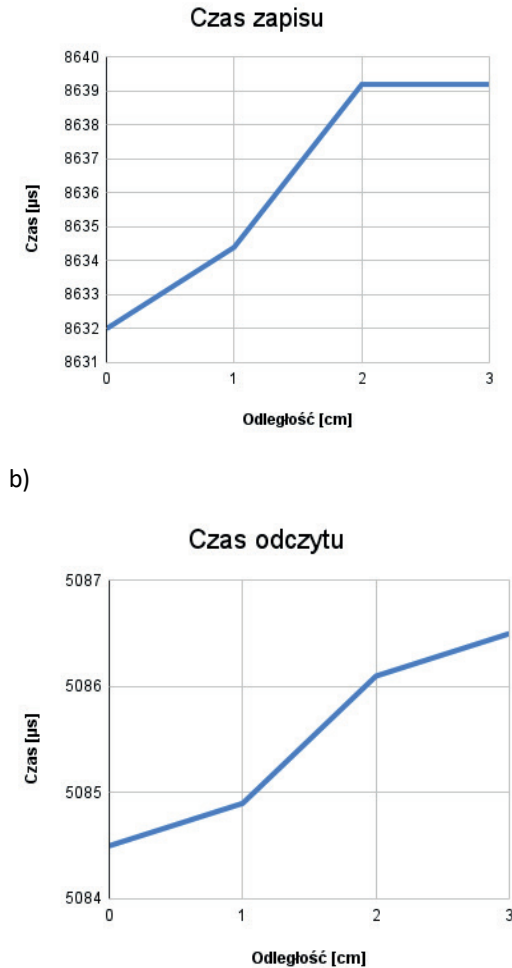
W ramach weryfikacji skonstruowanego modelu przeprowadzono dodatkowe pomiary czasów odczytu i zapisu danych w pamięci identyfikatora RFID, w zależności od orientacji przestrzennej anteny czytnika względem identyfikatora. W pomiarach wykorzystano czytnik RFID RC522, działający na częstotliwości 13,56 MHz oraz identyfikatory RFID również działające na częstotliwości 13,56 MHz. W badaniu oceniano wpływ zmian w orientacji przestrzennej (położenie i odległość)



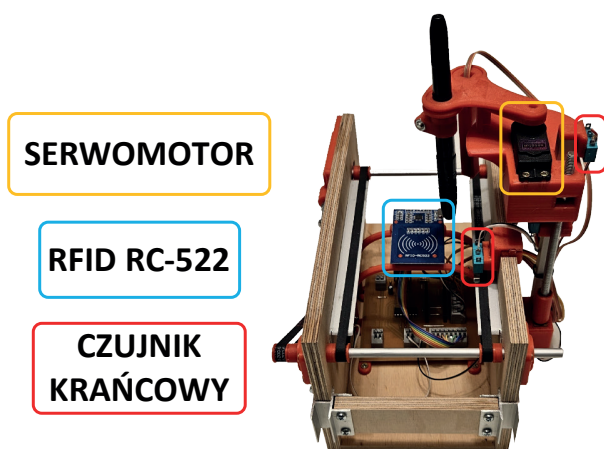
Rys. 9. Identyfikator RFID z obszarami danych roboczych
Fig. 9. RFID identifier with work data areas



Rys. 10. Produkty końcowe: a) brak awarii, b) awaria na stacji 4, c) awaria na stacji 3, d) awaria na stacji 2, e) awaria na stacji 1
Fig. 10. Final products: a) no failures, b) failure at station 4, c) failure at station 3, d) failure at station 2, e) failure at station 1



Rys. 11. Stanowisko pomiarowe
Fig. 11. Measurement station



Rys. 12. a) czas odczytu w pozycji równoległej,
b) czas zapisu w pozycji równoległej
Fig. 12. a) read time at parallel position, b) write time at parallel position

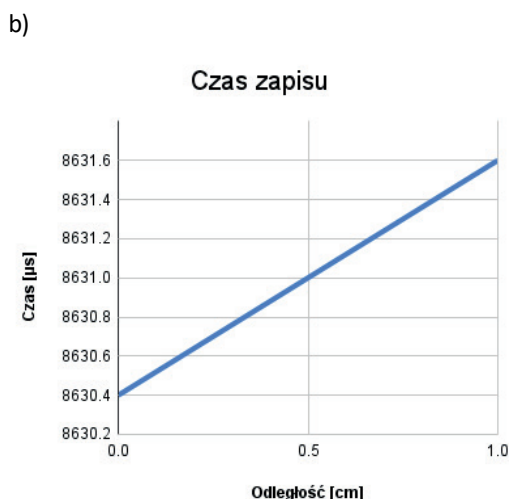
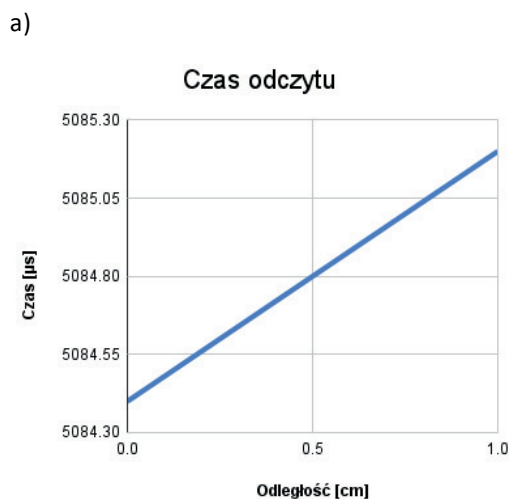
na czas odczytu i zapisu danych w pojedynczym bloku pamięci identyfikatora RFID. Za każdym razem rejestrowano te same dane. Zestaw pomiarowy został zbudowany z elementów płyty OSB, czytnika RFID RC-522 oraz wsporników i złączy wykonanych w technologii druku 3D. Przedstawiona konfiguracja została zilustrowana na rys. 11.

Podczas testów przeprowadzono serię ośmiu zapisów i ośmiu odczytów w ustalonej pozycji. Po zarejestrowaniu wyników konfiguracja została podniesiona o 1 cm, a testy zostały powtórzone. Wyniki przedstawiono na rys. 12.

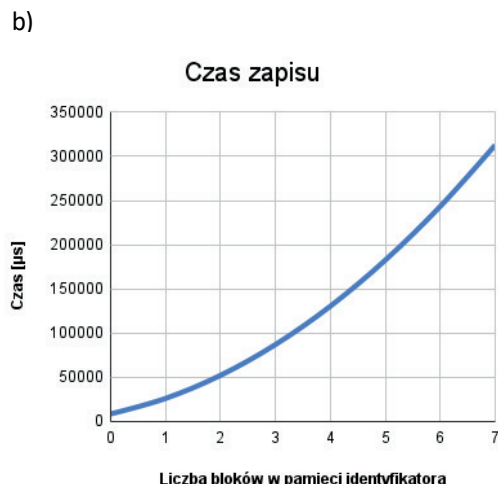
Uzyskane wykresy wyraźnie wskazują na zwiększenie czasu wymaganego do wykonania operacji odczytu i zapisu wraz ze wzrostem odległości między identyfikatorem a czytnikiem. Przy odległości większej od 3 cm nawiązanie połączenia z identyfikatorem było niemożliwe.

Kolejne pomiary przeprowadzono z identyfikatorem ustawionym pod kątem w stosunku do czytnika. Model został ustawiony tak, aby identyfikator znajdował się centralnie nad anteną czytnika. Podczas pomiarów wykonano serię ośmiu zapisów i ośmiu odczytów w ustalonej pozycji. Następnie urządzenie zostało podniesione o 1 cm i testy zostały powtórzone. Wyniki przedstawiono na rys. 13. Biorąc pod uwagę wymiary uchwytu, rzeczywista odległość od identyfikatora do czytnika w jego najniższym punkcie jest o około 3,4 mm większa niż odległość od uchwytu do czytnika. Uzyskane wykresy pokazują wzrost czasu wymaganego do wykonania operacji odczytu i zapisu wraz ze wzrostem odległości między identyfikatorem a czytnikiem. Powyżej odległości 1 cm nawiązanie połączenia z identyfikatorem było niemożliwe.

Wykonane zostały również pomiary dla prostopadłego ustawienia identyfikatora w stosunku do czytnika, jednak ze względu na brak możliwości nawiązania połączenia między urządzeniami w odległości większej niż 0 cm, prezentacja graficzna i porównywanie wartości na wykresach jest niemożliwe.



Rys. 13. a) czas odczytu przy usytuowaniu kątowym,
b) czas zapisu przy usytuowaniu kątowym
Fig. 13. a) read time with angular position, b) write time with angular position



Rys. 14. Wykresy czasu odczytu (a) i zapisu (b) dla różnej liczby bloków

Fig. 14. Reading (a) and writing (b) duration for varying numbers of blocks

Przygotowany model badawczy pozwala również na zbadanie wpływu ilości odczytywanych i zapisywanych danych na czas wykonywania operacji. Podczas badania model ustawiony był w orientacji równoległej z identyfikatorem umieszczonym w odległości 1 cm od czytnika. W kolejnych iteracjach pętli dane były odczytywane i zapisywane do coraz większej liczby obszarów pamięci w identyfikatorze. Uzyskane wyniki zostały przedstawione na rys. 14.

Uzyskane wykresy ilustrują szybki przyrost czasu wymaganego do wykonania operacji odczytu i zapisu wraz ze wzrostem liczby docelowych bloków pamięci w identyfikatorze.

5. Podsumowanie

Wykorzystując technikę RFID do analizy procesów produkcyjnych, należy jak najbardziej zoptymalizować przetwarzanie danych. Rejestrowanie wyników testów produkcyjnych na każdym etapie, zwłaszcza w przypadku dużych ilości informacji, może znacząco wpłynąć na cykl operacyjny maszyny, ostatecznie wydłużając czas potrzebny na wyprodukowanie każdego komponentu.

Badanie przedstawia koncepcję wykorzystania technice RFID w celu zwiększenia wydajności linii produkcyjnej, w szczególności w zakresie kontroli jakości na różnych etapach. Testy z wykorzystaniem laboratoryjnego modelu badawczego symulowały przemysłowe warunki pracy sprzętu. Wyniki badań doprowadziły do następujących wniosków:

- Opracowany model badawczy pozwala na badanie zachowania systemu RFID z możliwością modyfikacji wielu parametrów operacyjnych.
- Wpływ odległości między identyfikatorem RFID a czytnikiem na czas wymagany do operacji zapisu/odczytu danych jest minimalny. Średnia różnica przy zwiększaniu odległości nie przekracza zakresu ośmiu pomiarów w stałych warunkach systemowych, stanowiąc jedynie ułamek całkowitego czasu operacji.
- Najwyższą wydajność połączenia systemu osiągnięto z identyfikatorem RFID zorientowanym równolegle do czytnika. Taka konfiguracja zapewnia skuteczne działanie w najszerszym zakresie odległości.
- Najniższą wydajność połączenia zaobserwowano przy orientacji prostopadłej. W tych warunkach geometrycznych nawiązanie połączenia okazało się największym wyzwaniem.
- Ilość danych wymienianych między elementami systemu RFID znacząco wpływa na całkowity czas działania. Wzrost czasu obsługi n bloków waha się od 30 % do 300 % w porównaniu do obsługi $n-1$ bloków.

Zebrane wyniki badań zapewniają wgląd w wydajność systemu RFID, gdy zmieniane są różne parametry operacyjne. Uwzględnienie tych czynników w projektowaniu systemów RFID ułatwi tworzenie stabilnych systemów, szczególnie w kontekście maszyn i zastosowania techniki RFID w procesach produkcyjnych.

Bibliografia

1. Rafiquea M.Z., Haidera M., Raheema A., Ab Rahmanb M.N., Amjada M.S., *Essential Elements for Radio Frequency Identification (RFID) adoption for Industry 4.0 Smart Manufacturing in Context of Technology-Organization-Environment (TOE) Framework—A Review*, "Jurnal Kejuruteraan", Vol. 34, No. 1, 2022, DOI: 10.17576/jkukm-2022-34(1)-01.
2. Xu S., Chen J., Wu M., Zhao C., *E-commerce supply chain process optimization based on whole-process sharing of internet of things identification technology*, "Computer Modeling in Engineering and Sciences", Vol. 126, No. 2, 2021, 843–854, DOI: 10.32604/cmescs.2021.014265.
3. Demčák J., Židek K., Krenický T., *Digital Twin for Monitoring the Experimental Assembly Process Using RFID Technology*, "Processes", Vol. 12, No. 7, 2024, DOI: 10.3390/pr12071512.
4. Pasupuleti V., Thuraka B., Kodete C.S., Malisetty S., *Enhancing Supply Chain Agility and Sustainability through Machine Learning: Optimization Techniques for Logistics and Inventory Management*, "Logistics", Vol. 8, No. 3, 2024, DOI: 10.3390/logistics8030073.
5. Rojek I., Jasiulewicz-Kaczmarek M., Piszcz A., Galas K., Mikołajewski D., *Review of the 6G-Based Supply Chain Management within Industry 4.0/5.0 Paradigm*, "Electronics", Vol. 13, No. 13, 2024, DOI: 10.3390/electronics13132624.
6. Santos J.A.M., Martins M.S.E., Pinto R.M., Vieira S.M., *Towards Sustainable Inventory Management: A Many-Objective Approach to Stock Optimization in Multi-Storage Supply Chains*, "Algorithms", Vol. 17, No. 6, 2024, DOI: 10.3390/a17060271.
7. Parodos L., Tsolakis O., Tsoukos G., Xenou E., Ayfantopoulou G., *Business Model Analysis of Smart City Logistics Solutions Using the Business Model Canvas: The Case of an On-Demand Warehousing E-Marketplace*, "Future Transportation", Vol. 2, No. 2, 2022, 467–481, DOI: 10.3390/futuretransp2020026.
8. Gomes H., Navio F., Gaspar P.D., Soares V.N.G.J., Caldeira J.M.L.P., *Radio-Frequency Identification Traceability System Implementation in the Packaging Section of an Industrial Company*, "Applied Sciences", Vol. 13, No. 23, 2023, DOI: 10.3390/app132312943.
9. 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.
10. Zhou W., Piramuthu S., *Manufacturing with item-level RFID information: From macro to micro quality control*, "International Journal of Production Economics", Vol. 135, No. 2, 2012, 929–938, DOI: 10.1016/j.ijpe.2011.11.008.
11. Bibi F., Guillaume C., Gontard N., Sorli B., *A review: RFID technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products*, "Trends in Food Science & Technology", Vol. 62, 2017, 91–103, DOI: 10.1016/j.tifs.2017.01.013.
12. Zuo J., Feng J., Gameiro M., Tian Y., Liang J., Wang Y., Ding J., He Q., *RFID-based sensing in smart packaging for food applications: A review*, "Future Foods", Vol. 6, 2022, DOI: 10.1016/j.fufo.2022.100198.
13. Bendavid Y., Boeck H., Philippe R., *RFID-Enabled Traceability System for Consignment and High Value Products: A Case Study in the Healthcare Sector*, "Journal of Medical Systems", Vol. 36, 2012, 3473–3489, DOI: 10.1007/s10916-011-9804-0.
14. Yadav B., (2024). *Smart RFID and IoT-Based Patient Monitoring Systems in Modern Healthcare*, "International Journal of Engineering and Management Research", Vol. 14, No. 5, 2024, 89–93, DOI: 10.5281/zenodo.14064940.
15. Yi J., Chen J., *Enhancement of Two-Dimensional Barcode Restoration Based on Recurrent Feature Reasoning and Structural Fusion Attention Mechanism*, "Electronics", Vol. 13, No. 10, 2024, DOI: 10.3390/electronics13101873.
16. Wang L., Luo Z., Guo R., Li Y., *A Review of Tags Anti-Collision Identification Methods Used in RFID Technology*, "Electronics", Vol. 12, No. 17, 2023, DOI: 10.3390/electronics12173644.
17. Finkenzeller K., *RFID Handbook—Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency*

- Identification and Near-Field Communication*, 3rd ed., Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2010.
18. Nizioł M., Jankowski-Mihulowicz P., Węglarski M., *Determination of Parameters of Radio Frequency Identification Transponder Antennas Dedicated to IoTT Systems Located on Non-Planar Objects*, "Electronics", Vol. 13, No. 14, 2024, DOI: 10.3390/electronics13142800.
 19. Lai Y.-C., Chen S.-Y., Hailemariam Z.L., Lin C.-C., *A Bit-Tracking Knowledge-Based Query Tree for RFID Tag Identification in IoT Systems*, "Sensors", Vol. 22, No. 9, 2022, DOI: 10.3390/s22093323.
 20. Filho I.E.d.B., Silva I., Viegas C.M.D., *An Effective Extension of Anti-Collision Protocol for RFID in the Industrial Internet of Things (IIoT)*, "Sensors", Vol. 18, No. 12, 2018, DOI: 10.3390/s18124426.
 21. Dastres R., Soori M., Asamel M., *Radio Frequency Identification (RFID) based wireless manufacturing systems, a review*, "Independent Journal of Management & Production", Vol. 13, No. 1, 2022, 258–290, DOI: 10.14807/ijmp.v13i1.1497.
 22. Elbasani E., Siriporn P., Choi J.S., *A Survey on RFID in Industry 4.0*, *Internet of Things for Industry 4.0: Design, Challenges and Solutions*, 2020, 1–16, DOI: 10.1007/978-3-030-32530-5_1.
 23. Hakeem A.A., Solyali D., Asmael M., Zeeshan Q., *Smart manufacturing for Industry 4.0 using radio frequency identification (RFID) technology*, "Jurnal Kejuruteraan", Vol. 32, No. 1, 2020, 31–38, DOI: 10.17576/JKUKM-2020-32(1)-05.
 24. Budzik G., Woźniak J., Paszkiewicz A., Przeszlowski Ł., Dziubek T., Dębski M., *Methodology for the Quality Control Process of Additive Manufacturing Products Made of Polymer Materials*, "Materials", Vol. 14, No. 9, 2021, DOI: 10.3390/ma14092202.
 25. Dobkin D.M., *The RF in RFID: UHF RFID in Practice*, 2nd ed., Newnes: Oxford, UK, 2012.

Automated Production Line Process Validation Using RFID Technology

Abstract: RFID technology allows for the automation of production processes, especially in quality control, resource management and production optimization roles. In this study, a laboratory model of a production line was created, using RFID tags to identify the accurate processing of a component at several processing stages and its final sorting. Test results confirm the effectiveness of the system in product classification and show the influence of orientation and distance between tags and readers on system performance.

Keywords: RFID, manufacturing automation, quality control, Industry 4.0, production line

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.



mgr inż. Arkadiusz Stęchły

arkadiusz.stechly@kneiti.prz.edu.pl

ORCID: 0009-0006-5200-761X

Student Politechniki Rzeszowskiej, gdzie ukończył studia pierwszego stopnia na kierunku Automatyka i Robotyka. Kontynuuje studia drugiego stopnia na kierunku Informatyka na specjalności Cyberbezpieczeństwo i technologie chmurowe. Realizuje projekty naukowe w ramach koła naukowego, specjalizując się w tworzeniu oprogramowania wykorzystującego technologię wirtualnej i rozszerzonej rzeczywistości.



dr inż. Bartosz Trybus

btrybus@kia.prz.edu.pl

ORCID: 0000-0002-4588-3973

Adiunkt w Katedrze Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej. Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym, Automatyki, Informatyki i Elektroniki AGH w Krakowie. Doktorat z informatyki uzyskał w 2004 r. Jego główne badania dotyczą systemów czasu rzeczywistego i środowisk wykonawczych oprogramowania sterującego.

**Adrian Kosior**

173641@stud.prz.edu.pl

ORCID: 0009-0001-3997-0018

Student Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza, gdzie studiuje na kierunku Informatyka na specjalności Informatyka w przedsiębiorstwie. Realizuje projekty w ramach Koła Naukowego Elektroniki i Technologii Informatycznych, specjalizując się w programowaniu mikrokontrolerów i układach elektronicznych oraz interesując się technologiami XR.

**mgr inż. Marek Ruman**

mruman@elcont.pl

ORCID: 0009-0008-7753-3522

Absolwent Politechniki Rzeszowskiej na kierunkach Automatyka i robotyka I stopnia oraz Elektrotechnika II stopnia. Projektant systemów sterowania w przemyśle maszynowym z ukierunkowaniem na układy bezpieczeństwa maszyn. W ramach prac wykorzystuje umiejętności z dziedziny elektryki, pneumatyki i mechaniki w celu poprawy stopnia zapewnienia bezpieczeństwa przez maszyny przemysłowe.

