

STRESZCZENIE

Rozprawa doktorska dotyczy opracowania i wdrożenia inteligentnego systemu nadzorowania zautomatyzowanego procesu technologicznego konfekcjonowania wyrobów w przedsiębiorstwie Mróz S.A. W procesie konfekcjonowania zidentyfikowano trzy krytyczne operacje: naważanie, pakowanie oraz etykietowanie. To właśnie w tych obszarach najczęściej dochodziło do powstawania niezgodności jakościowych, strat surowcowych i reklamacji klientów, co wskazało na potrzebę opracowania rozwiązania integrującego narzędzia analityczne, systemy wizyjne i metody sztucznej inteligencji.

Celem pracy było zaprojektowanie oraz implementacja systemu nadzorowania, który umożliwia cyfrową akwizycję danych procesowych, analizę parametrów technologicznych oraz predykcyjne wspomaganie sterowania procesem. Rozwiązanie miało zapewnić wczesne wykrywanie odchyleń, ograniczenie liczby badań niszczących, a także wsparcie decyzyjne operatorów w czasie rzeczywistym. Opracowana architektura obejmuje cztery warstwy (akwizycji, analityczną, decyzyjną i wizualizacyjną) oraz pięć modułów funkcjonalnych, dedykowanych poszczególnym obszarom procesu.

W ramach badań opracowano i zweryfikowano kilka kluczowych modeli predykcyjnych i diagnostycznych. Najważniejszym osiągnięciem był model predykcyjny oparty na regresji logistycznej służący do prognozowania ryzyka mikronieszczelności w procesie pakowania. Równolegle zbudowano i zwalidowano klasyfikator wizyjny oparty na konwolucyjnych sieciach neuronowych. Uzupełnieniem tych rozwiązań był model diagnostyczny analizujący zmienność temperatury elementów grzewczych maszyn pakujących, wspierający ocenę stabilności procesu. W module etykietowania zastosowano algorytmy OCR i analizy kodów, które umożliwiły pełną automatyzację kontroli treści etykiet i jakości nadruków. Dodatkowo prace obejmowały budowę i kategoryzację bazy danych obrazowych, przygotowanie zbiorów treningowych i walidacyjnych, zastosowanie metod augmentacji oraz przeprowadzenie walidacji systemu w warunkach przemysłowych.

Walidacja w rzeczywistym środowisku produkcyjnym wykazała znaczną poprawę stabilności i efektywności procesu. Zaobserwowano spadek odchyleń w masie porcji, wzrost wydajności linii oraz poprawę wskaźników efektywności wykorzystania maszyn, a także redukcję reklamacji i strat surowcowych. Wyniki te jednoznacznie potwierdziły skuteczność opracowanego rozwiązania.

Rezultaty badań mają wymiar poznawczy i użyteczny. W aspekcie naukowym zidentyfikowano zależności pomiędzy parametrami technologicznymi a stabilnością procesu, a także potwierdzono możliwość zastosowania metod sztucznej inteligencji w środowisku przemysłowym. W wymiarze aplikacyjnym rozprawa stanowi przykład skutecznego wdrożenia architektury warstwowej i modułowej zgodnie z koncepcją Przemysłu 4.0, wskazując jednocześnie na jej potencjał adaptacji do innych linii technologicznych i branż przemysłowych.

ABSTRACT

This doctoral dissertation concerns the development and implementation of an intelligent monitoring system for the automated technological process of product packaging at Mróz S.A. Within the packaging process, three critical operations were identified: weighing, sealing, and labelling. These stages were most frequently associated with quality nonconformities, raw material losses, and customer complaints, which highlighted the need for a solution integrating analytical tools, vision systems, and artificial intelligence methods.

The objective of the dissertation was to design and implement a monitoring system enabling digital acquisition of process data, analysis of technological parameters, and predictive support for process control. The solution was intended to ensure early detection of deviations, reduce the number of destructive tests, and provide real-time decision support for operators. The proposed architecture comprises four layers (acquisition, analytical, decision-making, and visualization) and five functional modules dedicated to specific process areas.

As part of the research, a series of predictive and diagnostic models were developed and validated. The most significant achievements include a logistic regression model for predicting micro-leakages, a diagnostic model analysing temperature variability of the heating elements of sealing machines, and convolutional neural networks (CNN) for classifying packaging defects. In the labelling module, OCR algorithms and code analysis were applied, enabling full automation of label content and print quality inspection. Furthermore, the research encompassed the construction and categorization of an image database, preparation of training and validation datasets, the application of data augmentation techniques, and the industrial validation of the system.

Validation in a real production environment demonstrated a significant improvement in process stability and efficiency. Reductions in portion weight deviations were observed, along with increased line throughput, enhanced equipment effectiveness indicators, and a decline in customer complaints and raw material losses. These outcomes clearly confirmed the effectiveness of the proposed solution.

The results of the dissertation have both cognitive and utilitarian dimensions. From a scientific perspective, dependencies between technological parameters and process stability were identified and quantified, and the applicability of artificial intelligence methods in industrial environments was confirmed. From a practical perspective, the dissertation provides an example of a successful implementation of a layered and modular system architecture in line with the Industry 4.0 concept, while also demonstrating the potential for adaptation to other production lines and industrial sectors.