

Projekt zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego do wytwarzania listew wtryskowych

Robert Adamczyk¹, Arkadiusz Trąbka^{2,*}

¹ Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Polska, robertooadamczyk@gmail.com

² Uniwersytet Bielsko-Bialski, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Polska, atrabka@ubb.edu.pl

* Autor korespondencyjny, atrabka@ubb.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono projekt zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego do wytwarzania listew wtryskowych do silników spalinowych. Modele geometryczne elementów gniazda produkcyjnego wykonano w programie Autodesk Inventor. Wykorzystując te modele, w programie Fanuc Roboguide opracowano kompleksowy model zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego, zaimplementowano programy sterujące dla robotów i urządzeń pomocniczych, a także zasymulowano działanie całego systemu produkcyjnego.

Słowa kluczowe: Zrobotyzowane gniazdo produkcyjne; listwy wtryskowe do silników spalinowych; symulacja numeryczna; Fanuc Roboguide;

Design of a robotized production cell for injection rails manufacturing

Robert Adamczyk¹, Arkadiusz Trąbka^{2,*}

¹ University of Bielsko-Biala, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Poland, robertooadamczyk@gmail.com

² University of Bielsko-Biala, Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Poland, atrabka@ubb.edu.pl

* Corresponding author, atrabka@ubb.edu.pl

Abstract: The paper presents the design of a robotized production cell for internal combustion engines injection rails manufacturing. The geometric models of the production cell components were created in Autodesk Inventor. Using these models, a robotized production cell model was developed in Fanuc Roboguide, control programs for robots and auxiliary equipment were implemented, and the operation of the entire production system was simulated.

Keywords: Robotized production cell; injection rails for internal combustion engines; numerical simulation; Fanuc Roboguide;

1. Wprowadzenie

W obliczu nieustannie postępującej automatyzacji i wzrostu znaczenia efektywności w produkcji przemysłowej, projektowanie zaawansowanych systemów zrobotyzowanych staje się kluczowe dla utrzymania konkurencyjności i opłacalności produkcji [1, 2]. Planowanie zrobotyzowanych stanowisk obejmuje różnorodne działania, takie jak zapewnienie odpowiedniej przestrzeni, bezpieczeństwa i zatrudnienie kwalifikowanej kadry [3]. Istotne jest również dostosowanie stanowisk pracy do współdziałania z robotami oraz możliwość bezpośredniej współpracy operatora

z robotem, czego przykładem są roboty współpracujące [4]. Przykładowe rozwiązania, dotyczące robotyzacji różnych procesów produkcyjnych, zamieszczono w pracach [5-8].

2. Cel pracy

Za cel niniejszej pracy przyjęto wykonanie projektu zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego do wytwarzania listew wtryskowych do silników spalinowych oraz opracowanie programów sterujących dla robotów i urządzeń pomocniczych. Celem pracy jest również przeprowadzenie symulacji procesu produkcyjnego, aby zapewnić prawidłowość działania gniazda produkcyjnego i uzyskać jak najwyższą jego wydajność.

3. Struktura gniazda produkcyjnego i opis przebiegu procesu wytwarzania listew wtryskowych

Przystępując do opracowania struktury zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego do wytwarzania listew wtryskowych, brano pod uwagę takie kwestie jak:

- bezpieczeństwo,
- koszty i łatwość użytkowania,
- typ robota zastosowanego na danym stanowisku,
- zajmowana powierzchnia,
- tempo produkcji.

Analizując powyższe założenia, a także budowę istniejących stanowisk do produkcji listew wtryskowych, w ramach projektu zdecydowano o przyjęciu koncepcji gniazda produkcyjnego, w którym dotychczasowe, oddzielne stanowiska, zostaną połączone za pomocą zautomatyzowanej linii transportowej (rys. 1). Założono, że proces produkcji będzie odbywał się bez udziału pracowników, a operator zajmować się będzie jedynie nadzorowaniem jakości gotowych produktów.

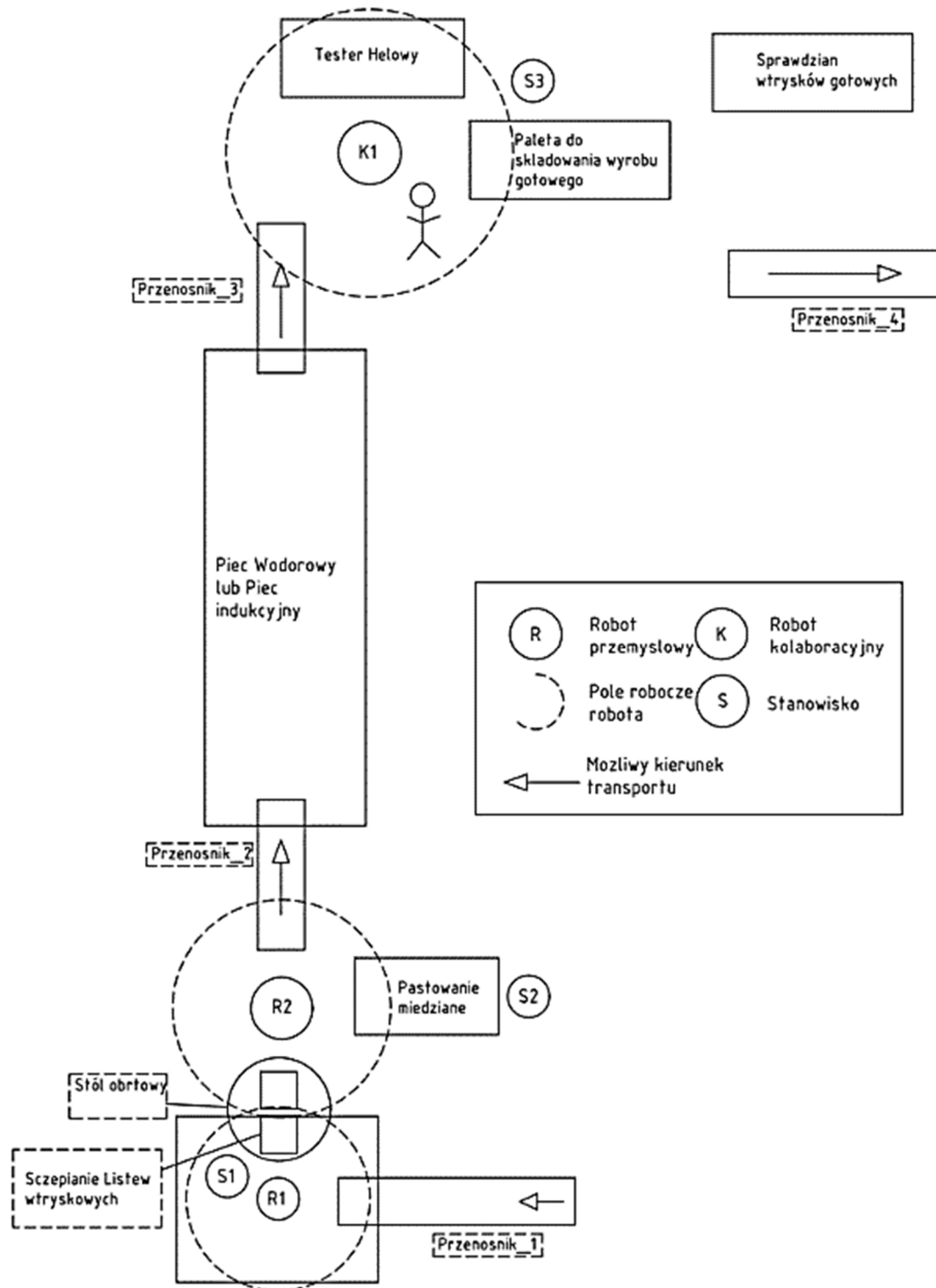
Jak przedstawiono na rysunku 1 proces produkcji rozpocznie się od przenośnika_1, którym komponenty listwy wtryskowej zostaną dostarczone do stanowiska oznaczonego symbolem S1. Umieszczony na tym stanowisku robot R1 zostanie wyposażony w dwufunkcyjne narzędzie, którego jedna część zostanie wyposażona w chwytak, a druga w głowicę laserową. Przy użyciu chwytaka robot R1 pobierze komponenty listwy z przenośnika i umieści je na stole obrotowym. Po ułożeniu komponentów na stole i przestawieniu narzędzia na tryb spawania, robot wykona wstępne połączenie komponentów listwy wtryskowej metodą spawania punktowego.

Następnie stół obrotowy wykona obrót, w wyniku czego listwa złożona ze szepionych punktowo komponentów znajdzie się w przestrzeni roboczej robota R2, który zostanie umieszczony na stanowisku oznaczonym symbolem S2. Zadanie robota R2 będzie polegało na pobraniu listwy ze stołu, a następnie manipulowaniu nią podczas nakładania pasty miedzianej wzdłuż krawędzi styku łączonych komponentów.

Po nałożeniu pasty miedzianej robot R2 odłoży listwę na przenośnik_2, przy użyciu którego zostanie ona przetransportowana do pieca wodorowego. W piecu tym, w kontrolowanej atmosferze wodorowej, nastąpi zalanie pastą miedzianą szczelin w miejscach styku łączonych komponentów, a ponadto w procesie wyżarzania nastąpi unormowanie własności mechanicznych listwy. Jest to kluczowy etap procesu, który gwarantuje właściwą jakość i trwałość produktu.

Po zakończeniu procesu wyżarzania listwa wtryskowa zostanie przetransportowana przenośnikiem_3 na stanowisko oznaczone symbolem S3. Na stanowisku tym zostanie umieszczony robot współpracujący (kolaboracyjny K1). Robot ten odbierze listwę z przenośnika, a następnie umieści ją w komorze testera helowego, gdzie zostanie przeprowadzona analiza szczelności wykonanych wcześniej połączeń. Po zakończeniu testu robot K1 przeniesie listwę z komory testera na stół, gdzie operator przy użyciu kamery wykona zdjęcia i przeprowadzi inspekcję wizualną miejsc połączenia komponentów.

Po zakończeniu kontroli jakości operator umieści listwę na przenośniku_4, którym opuści ona gniazdo produkcyjne.

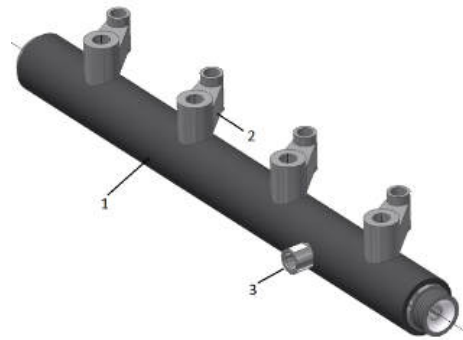


Rysunek 1. Struktura zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego do wytwarzania listew wtryskowych

4. Modele geometryczne elementów stanowisk produkcyjnych

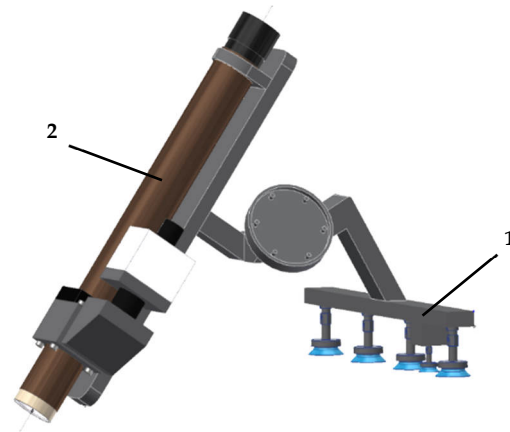
Do opracowania modeli geometrycznych elementów stanowisk wchodzących w skład projektowanego gniazda produkcyjnego wykorzystano oprogramowanie CAD – Autodesk Inventor. Prace rozpoczęto od wykonania modelu geometrycznego listwy wtryskowej (występującej pod handlową nazwą Common Rail), która stanowi element układu paliwowego silnika spalinowego odpowiedzialny za dostarczanie paliwa do wtryskiwaczy.

Model geometryczny listwy wtryskowej, w którym wyodrębniono trzy główne komponenty: zasobnik paliwa 1, bloki funkcyjne 2 oraz gniazdo czujnika 3, przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Model geometryczny listwy wtryskowej (1 - zasobnik paliwa, 2 - bloki funkcyjne, 3 - gniazdo czujnika)

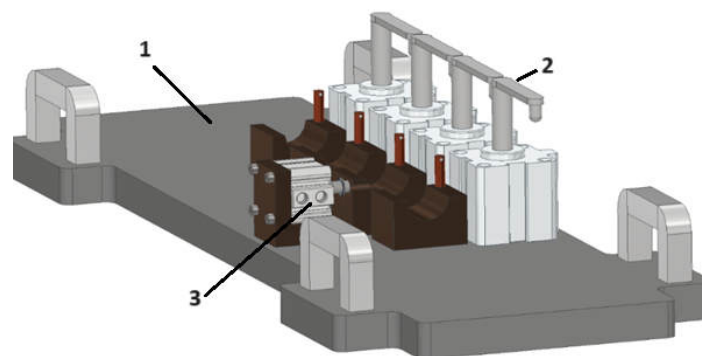
Kolejny z modeli geometrycznych pokazano na rysunku 3. Przedstawia on specjalnie zaprojektowane dla robota R1 (rys. 1) dwufunkcyjne narzędzie, w którym zintegrowano chwytak podciśnieniowy 1 używany do pobierania z przenośnika kolejnych komponentów listwy wtryskowej oraz głowicę laserową 2 typu BEO D25 firmy TRUMPF przeznaczoną do spawania punktowego.



Rysunek 3. Model geometryczny dwufunkcyjnego narzędzia składającego się z chwytaka podciśnieniowego 1 i głowicy laserowej 2

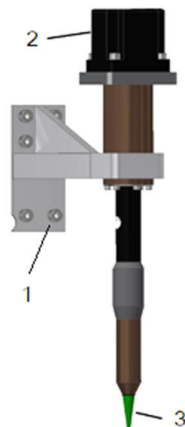
W zaprojektowanym narzędziu zastosowano najmniejszy z dostępnych układów optycznych przeznaczonych do współpracy z laserami impulsowymi, a specjalna konstrukcja pozwala działać robotowi bez przezbrojenia.

Poszczególne komponenty listwy wtryskowej (pokazane na rysunku 2) są umieszczane przy użyciu chwytaka podciśnieniowego w matrycy montażowej, której model geometryczny pokazano na rysunku 4, a po unieruchomieniu przez siłowniki odbywa się proces ich wstępnego łączenia metodą spawania punktowego. Matryca składa się z trzech części: podstawy 1, siłowników 2 unieruchamiających bloki funkcyjne względem zasobnika paliwa oraz siłownika 3 unieruchamiającego gniazdo czujnika względem zasobnika paliwa.



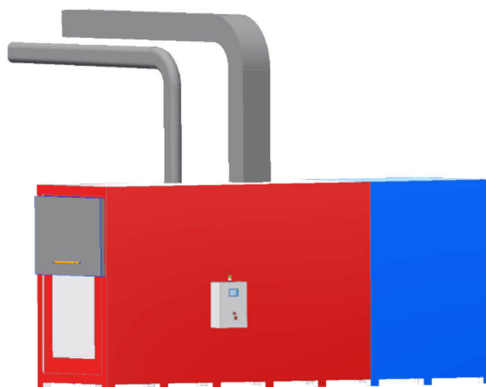
Rysunek 4. Model geometryczny matrycy montażowej do wstępnego łączenia komponentów listwy wtryskowej metodą spawania punktowego (1 - podstawa matrycy, 2 - siłowniki unieruchamiające bloki funkcyjne względem zasobnika paliwa, 3 - siłownik unieruchamiający gniazdo czujnika względem zasobnika paliwa)

Jako następny element gniazda produkcyjnego wykonano model geometryczny głowicy do nakładania pasty miedzianej (rys. 5). W modelu tym wyodrębniono uchwyt 1, serwomotor z dozownikiem pasty 2 oraz dyszę 3.



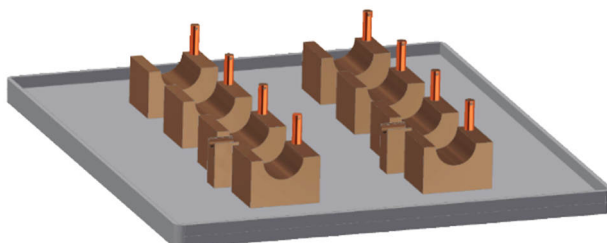
Rysunek 5. Model geometryczny głowicy do nakładania pasty miedzianej (1 - uchwyt, 2 - serwomotor z dozownikiem pasty, 3 - dysza)

Po zakończeniu cyklu pastowania listwy wtryskowe przechodzą kolejno przez komorę grzewczą i komorę chłodzącą pieca wodorowego, którego model geometryczny przedstawiono na rysunku 6. W komorze grzewczej, w kontrolowanej atmosferze wodorowej, następuje zalanie pastą miedzianą szczelin w miejscach połączeń, a także zachodzi proces wyżarzania mający na celu unormowanie własności mechanicznych listew. Następnie listwy trafiają do części chłodzącej pieca, aby osiągnąć temperaturę wymaganą na kolejnym etapie procesu wytwarzania.



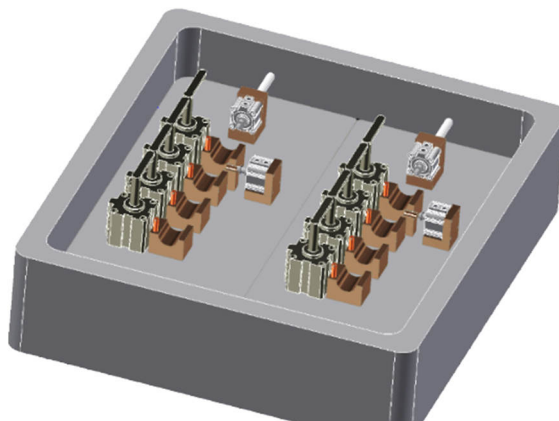
Rysunek 6. Model geometryczny komór: grzewczej i chłodzącej pieca wodorowego

Do transportowania listew wtryskowych przez komory pieca wodorowego została zaprojektowana taca, której model geometryczny pokazano na rysunku 7.



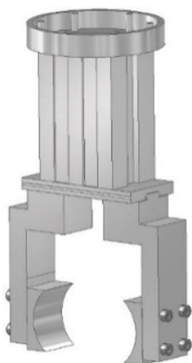
Rysunek 7. Model geometryczny tacy do transportowania listew wtryskowych przez komory pieca wodorowego

Po opuszczeniu komory chłodzącej listwy wtryskowe są poddawane testowi próżniowemu na stanowisku przeznaczonym do sprawdzania szczelności połączeń wykonanych przy użyciu pasty miedzianej. Model geometryczny komory, w której proces sprawdzania szczelności połączeń przeprowadzany jest przy użyciu helu, przedstawiono na rysunku 8.



Rysunek 8. Model geometryczny komory helowego detektora nieszczelności

Do przenoszenia, do komory helowego detektora nieszczelności, listew wtryskowych opuszczających komorę chłodzącą, zaprojektowano chwytak, którego model geometryczny pokazano na rysunku 9.



Rysunek 9. Model geometryczny chwytaka dla robota współpracującego

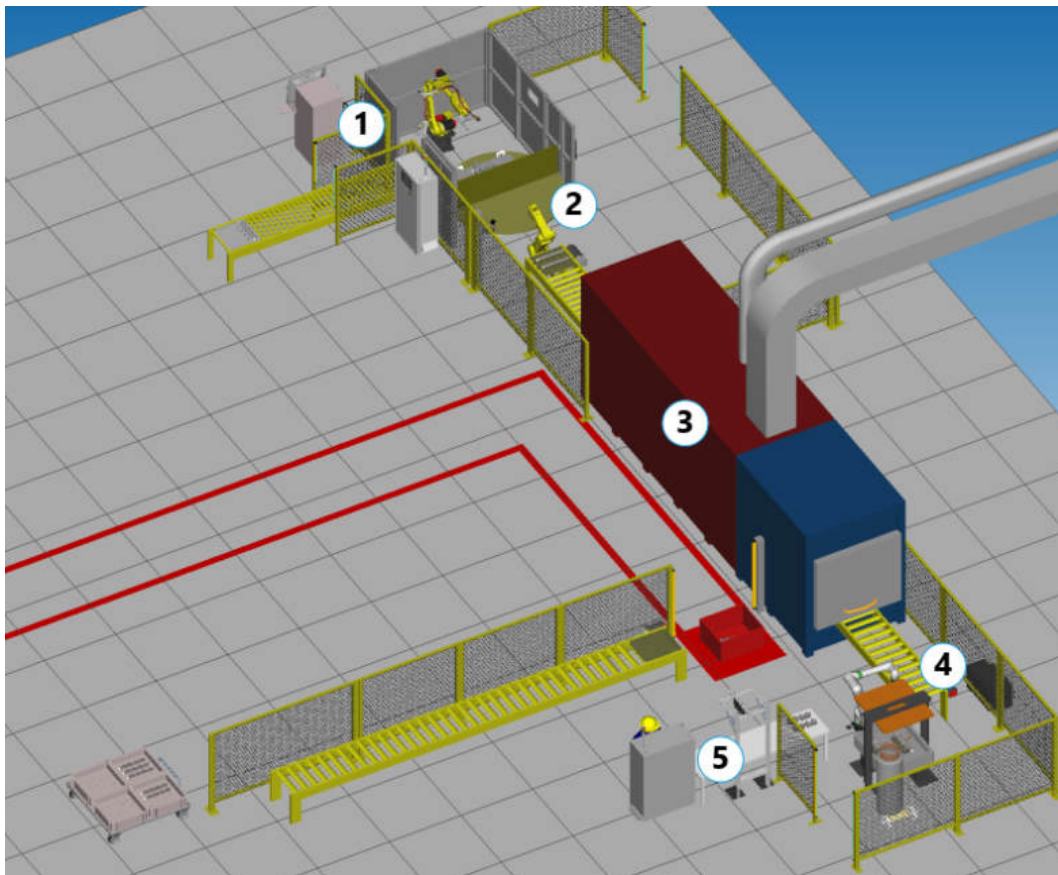
W celu zwiększenia bezpieczeństwa i dostosowania stanowiska do przepisów BHP, zaprojektowane zostały środki ochrony i zapobiegania wejściu do poszczególnych stanowisk podczas cyklu roboczego. Na pierwszym stanowisku pracy, gdzie realizowany jest proces spawania punktowego listew wtryskowych, zastosowano kurtynę spawalniczą, a dodatkowo na wejściach do cel roboczych zastosowano kurtyny świetlne.

5. Opracowanie modelu zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego

Model zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego do wytwarzania listew wtryskowych został opracowany w programie Fanuc Roboguide, bazując na wcześniej wykonanych modelach geometrycznych elementów składowych poszczególnych stanowisk. Opracowanie modelu rozpoczęto od wyboru modeli robotów dostosowanych do konfiguracji stanowisk oraz umożliwiających wykonanie prac przewidzianych do realizacji na poszczególnych stanowiskach. Następnie przeprowadzono konfigurację tzw. grup ruchu i przyporządkowano im odpowiednie serwonapędy. W kolejnym etapie prac serwomotory oraz siłowniki zostały zintegrowane z odpowiadającymi im modelami geometrycznymi elementów stanowisk, takich jak przenośniki, stół obrotowy, głowica do nakładania pasty miedzianej, pokrywa komory detektora nieszczelności.

Po zakończeniu działań przygotowawczych przystąpiono do rozmieszczenia, zgodnie z wcześniej przyjętą strukturą gniazda produkcyjnego (rys. 1), modeli geometrycznych pozostałych elementów zaimportowanych z programu Autodesk Inventor.

W wyniku przeprowadzonych działań otrzymano model zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego do wytwarzania listew wtryskowych, który pokazano na rysunku 10.



Rysunek 10. Model zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego do wytwarzania listew wtryskowych (1 - Stanowisko spawania punktowego, 2 - Stanowisko nakładania pasty miedzianej, 3 - Piec wodorowy i komora chłodząca, 4 - Stanowisko helowego detektora szczelności, 5 - Stanowisko operatora)

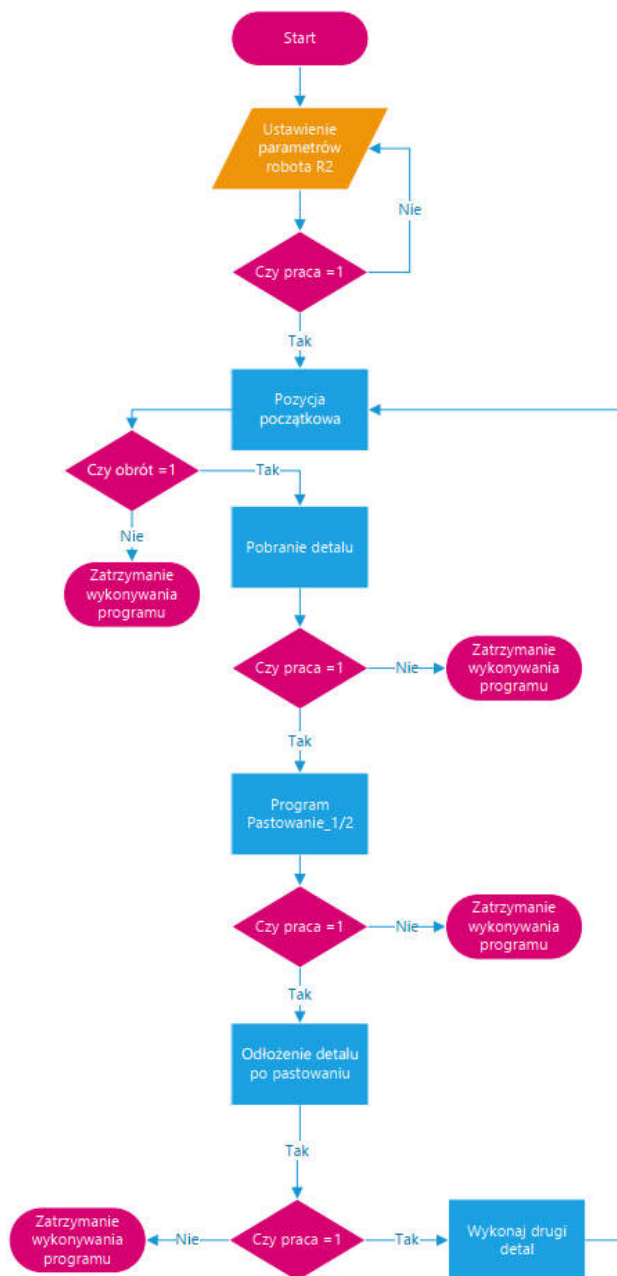
Ostatni etap działań wykonanych w ramach opracowania modelu zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego obejmował napisanie programów sterujących dla robotów oraz urządzeń pomocniczych.

Zarówno programowanie robotów, jak i programowanie urządzeń pomocniczych, odbywało się na dwa sposoby. Poprzez użycie zaimplementowanego w programie Roboguide edytora zwanego „Simulation Program Editor” oraz przy pomocy cyfrowego kłona rzeczywistego urządzenia do programowania ręcznego, znanego jako Teach Pendant. Użycie edytora „Simulation Program Editor” znacząco usprawnia proces tworzenia programów symulacyjnych, jednakże posiada pewne ograniczenia w kontekście manipulacji rejestrami. Aby dokonać zmian w rejestrach, niezbędne jest opracowanie dedykowanego programu przy użyciu Teach Pendanta. Następnie program ten można wywołać w ramach symulacji.

Z kolei kompleksowe programowanie przy użyciu wirtualnego Teach Pendanta jest ograniczone, ponieważ nie pozwala graficznie przedstawić interakcji między elementami systemu, przykładowo takich jak pobieranie i odkładanie detali, czy też przemieszczanie detali pomiędzy stanowiskami, co wymusza konieczność definiowania tych operacji w edytorze „Simulation Program Editor”.

Programy sterujące dla robotów oraz urządzeń pomocniczych opracowano etapami zgodnie z układem stanowisk tworzących gniazdo produkcyjne. W odniesieniu do każdego ze stanowisk zastosowano taką samą regułę programowania, polegającą na przyjęciu sekwencyjnej struktury programów sterujących, z wykorzystaniem komentarzy i etykiet, co znacząco ułatwia ich analizę i zrozumienie. Każdy z programów głównych został podzielony na kilka podprogramów, aby zwiększyć czytelność i ułatwić późniejsze modyfikacje.

Schemat blokowy przykładowego programu głównego dla robota przemysłowego R2 (rys. 1) i urządzeń pomocniczych zainstalowanych na stanowisku nakładania pasty miedzianej przedstawiono na rysunku 11.

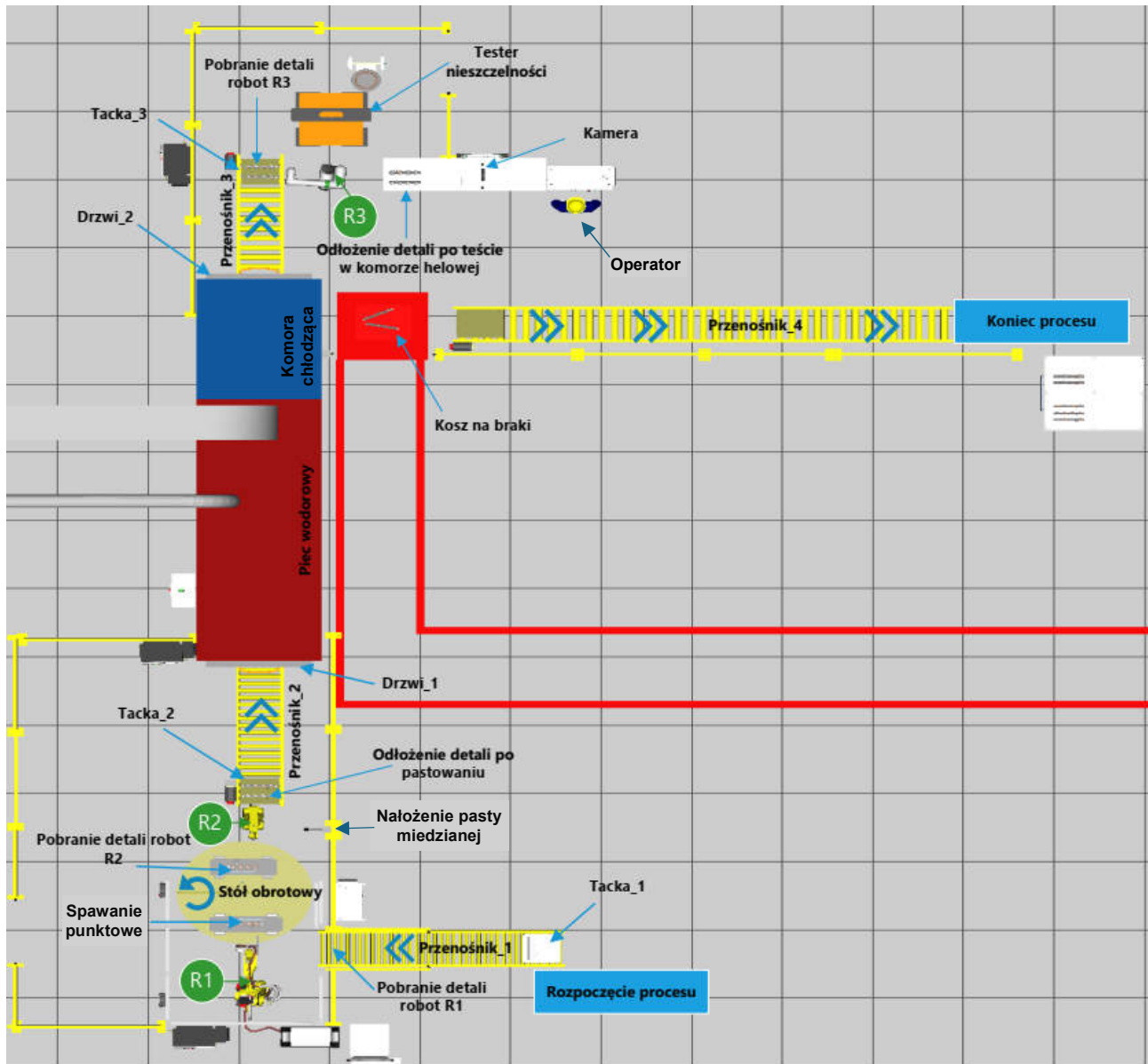


Rysunek 11. Schemat blokowy programu głównego dla robota R2 i urządzeń pomocniczych zainstalowanych na stanowisku nakładania pasty miedzianej

6. Symulacja przebiegu procesu wytwarzania listew wtryskowych w zrobotyzowanym gnieździe produkcyjnym

Po zakończeniu konfiguracji wszystkich elementów wchodzących w skład zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego i napisaniu programów sterujących, w programie Fanuc Roboguide przeprowadzono symulację przebiegu procesu wytwarzania listew wtryskowych.

Proces wytwarzania listew wtryskowych w zrobotyzowanym gnieździe produkcyjnym (rys. 12) jest inicjowany aktywacją obiektu Przenośnik_1, która następuje przez wyjście cyfrowe DO[1:Transporter] robota R1 (Fanuc ARC Mate 0iB). Po dotarciu elementów składowych listew wtryskowych do miejsca odbioru, w odpowiedzi na sygnał zezwalający z wejścia cyfrowego DI[1], robot R1 przemieszcza się do zdefiniowanej pozycji roboczej, pobiera kolejne elementy z przenośnika 1 i układa je w matrycy montażowej umieszczonej na stole obrotowym. Po unieruchomieniu przez siłowniki komponentów listwy wtryskowej, rozpoczyna się proces ich spawania punktowego przy użyciu lasera impulsowego. Po zakończeniu tej operacji i aktywacji wyjścia cyfrowego DO[2:Obrotnik], stół obrotowy wykonuje obrót umożliwiając robotowi R2 (Fanuc LR Mate 200iD/7L) przejście wstępnie połączonych komponentów.



Rysunek 12. Przebieg procesu wytwarzania listew wtryskowych w zrobotyzowanym gnieździe produkcyjnym

Robot R2, po otrzymaniu sygnału DI[2] oznaczającego zakończenie obrotu stołu, przemieszcza się do pobrania listwy, w następnym kroku aplikuje pastę miedzianą wzdłuż krawędzi styku łączonych komponentów, a następnie umieszcza listwę na obiekcie Tacka_2. Podczas operacji wykonywanych na stanowisku nakładania pasty miedzianej, na pierwszym stanowisku realizowane jest spawanie punktowe komponentów kolejnej listwy, po czym listwa ta trafia na stanowisko nakładania pasty miedzianej. Po umieszczeniu drugiej listwy na obiekcie Tacka_2, uruchamiany jest Przenośnik_2, którym tacka z listwami wtryskowymi zostaje przetransportowana przez komorę grzewczą i chłodzącą pieca wodorowego, a następnie trafia na Przenośnik_3, którym opuszcza komorę chłodzącą. Sterowanie obiektu Przenośnik_2 odbywa się poprzez wyjście cyfrowe DO[1] robota R2, natomiast obiektu Przenośnik_3 poprzez wyjście cyfrowe DO[3] robota R3 (Fanuc CRX-10iA/L). Aktywacja przenośnika 3 jest uzależniona od sygnału DI[3], generowanego po osiągnięciu przez obiekt Tacka_2 odpowiedniej pozycji na przenośniku 2.

Drzwi_1 i Drzwi_2, będące elementami pieca wodorowego, są sterowane odpowiednio przez wyjścia DO[2] robota R2 i DO[1] robota R3.

Po procesie wyżarzania, robot współpracujący R3 odbiera listwy i przenosi je do komory helowej w celu przeprowadzenia analizy szczelności. Zamknięcie komory i rozpoczęcie testu zaczyna się po wystereowaniu sygnału DO[4] z kontrolera robota R3. Na końcu linii produkcyjnej umieszczona jest kamera inspekcyjna przeprowadzająca test optyczny. Po pozytywnym zatwierdzeniu jakości listwy wtryskowej, jest ona przekładana przez operatora na obiekt

Przenośnik_4. Działanie kamery inspekcyjnej oraz przełożenie listwy przez operatora są inicjowane sygnałem RO[3] robota R3. Cały proces produkcyjny trwa nieprzerwanie, dopóki sygnał na wejściu DI[1] robota R1 ma stan ON.

7. Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono proces opracowania projektu zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego do wytwarzania listew wtryskowych do silników spalinowych. Modele geometryczne elementów gniazda produkcyjnego wykonano w programie Autodesk Inventor. Na bazie modeli geometrycznych w programie Fanuc Roboguide opracowano kompleksowy model gniazda produkcyjnego, w którym zastosowano roboty przemysłowe do wykonywania operacji na każdym ze stanowisk. Dla robotów oraz urządzeń pomocniczych opracowano programy sterujące. Poprawność opracowanych programów sprawdzono w trakcie testów symulacyjnych.

Kluczowym aspektem projektu, który wymaga szczególnego podkreślenia, jest implementacja robota współpracującego na stanowisku kontroli jakości. Robot ten zapewnia łatwą adaptację do zmiennych warunków pracy, pozwala na interakcję z człowiekiem, zastępuje pracowników przy wykonywaniu monotonicznych prac, a także zmniejsza ryzyko błędów ludzkich, co jest kluczowe dla bezpieczeństwa na linii produkcyjnej.

W trakcie realizacji pracy stwierdzono, że:

- Zastosowanie robotów w projektowanym gnieździe produkcyjnym do wytwarzania listew wtryskowych pozwala na osiągnięcie dużej precyzji i powtarzalności realizowanych procesów, co zostało zweryfikowane podczas testów symulacyjnych.
- Implementacja zrobotyzowanego gniazda produkcyjnego do wytwarzania listew wtryskowych znacząco wpływa na efektywność produkcji.
- Zaawansowane systemy bezpieczeństwa i monitoringu są kluczowe dla utrzymania wysokiej jakości i ciągłości produkcji. Zastosowanie takich systemów minimalizuje ryzyko awarii i związanych z nimi przestoju.
- Wykorzystanie oprogramowania typu CAD, np. Autodesk Inventor dla modelowania geometrycznego projektowanych elementów stanowiska umożliwia testowanie ich przydatności w symulowanym przebiegu procesu produkcyjnego.
- Program Fanuc Roboguide umożliwia zintegrowanie różnych elementów systemu i ich optymalizację. Dzięki temu można skrócić czas potrzebny na przygotowanie i uruchomienie linii produkcyjnej, co jest kluczowe dla utrzymania konkurencyjności na rynku.
- Mimo początkowych kosztów inwestycyjnych, zrobotyzowane gniazdo produkcyjne oferuje znaczące korzyści w zakresie redukcji kosztów operacyjnych.
- Zastosowanie zaawansowanych systemów kontroli jakości i precyzyjnych narzędzi pomiarowych gwarantuje wysoką jakość końcowego produktu.

Literatura

1. Kaczmarek W., Panasiuk J.: Robotyzacja procesów produkcyjnych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2018.
2. International Federation of Robotics: Editorial WR 2022 - Industrial Robots. https://ifr.org/img/worldrobotics/Editorial_WR_Industrial_Robots_2022.pdf (16.11.2023).
3. Kulik J., Wojtczak Ł.: Światowe trendy robotyki a wyzwania technologiczne Polskich małych i średnich przedsiębiorstw. *Pomiary Automatyka Robotyka* 2015, R. 19, Nr 4, 79–86.
4. Kaczmarek W., Panasiuk J.: Wybrane konstrukcje robotów przemysłowych. *Napędy i Sterowanie* 2018, Nr 9, 132–140.
5. Kaczmarek W., Jużak I.: Projekt zrobotyzowanego stanowiska do spawania kolan rur preizolowanych o różnej średnicy. *Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa* 2012.
6. Grzelak K., Trąbka A.: Projekt i symulacja zrobotyzowanej odlewni. *Projektowanie, badania i eksploatacja. Tom 1.* Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, 2019, 101-110.
7. Jaroszyński S., Trąbka A.: Projekt koncepcyjny zrobotyzowanego stanowiska do laserowego cięcia 3D. *Projektowanie, badania i eksploatacja. Tom 1.* Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, 2022, 219-230.
8. Kowalczyk J., Trąbka A.: Projekt koncepcyjny zrobotyzowanego stanowiska do spawania bram przesuwnych. *Projektowanie, badania i eksploatacja. Monografia.* Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego, 2023, 235-246.