



Projektowanie i sterowanie procesami

redakcja naukowa

Marian Marek Janczarek

Jerzy Lipski

MONOGRAFIE

Projektowanie i sterowanie procesami

Monografie – Politechnika Lubelska



Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
ul. Nadbystrzycka 36
20-618 LUBLIN

Projektowanie i sterowanie procesami

redakcja

Marian Marek Janczarek

Jerzy Lipski



Politechnika Lubelska
Lublin 2013

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Miron Czerniec

prof. dr hab. inż. Wiktor Taranenko

Redakcja i skład: Łukasz Wojciechowski

Publikacja wydana za zgodą Rektora Politechniki Lubelskiej

© Copyright by Politechnika Lubelska 2013

ISBN: 978-83-63569-45-7

Wydawca: Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38D, 20-618 Lublin

Realizacja: Biblioteka Politechniki Lubelskiej

Ośrodek ds. Wydawnictw i Biblioteki Cyfrowej

ul. Nadbystrzycka 36A, 20-618 Lublin

tel. (81) 538-46-59, email: wydawca@pollub.pl

www.biblioteka.pollub.pl

Druk: TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak

www.agencjatorp.pl

Elektroniczna wersja książki dostępna w Bibliotece Cyfrowej PL www.bc.pollub.pl

Nakład: 80 egz.

SPIS TERŚCI

DARIUSZ PLINTA, EWA GOLIŃSKA CYFROWA FABRYKA – SKANOWANIE, MODELOWANIE I SYMULACJA FUNKCJONOWANIA SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH.....	6
JAN DUDA, PAWEŁ WOJAKOWSKI PROJEKTOWANIE PROCESÓW I SYSTEMÓW OBRÓBKI W WARUNKACH WSPÓLBIEŻNEGO ROZWOJU WYROBU.....	16
JERZY STAMIROWSKI, DAWID SKRZYPCZYŃSKI. PROJEKTOWANIE ZROBOTYZOWANEGO PODSYSTEMU TRANSPORTU I MANIPULACJI DLA ZAUTOMATYZOWANYCH ELASTYCZNYCH SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH. ZARYS PROBLEMATYKI.....	30
ADRIAN KAMPA ANALIZA WYDAJNOŚCI PRACY RĘCZNEJ I PRACY ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO NA PRZYKŁADZIE SYMULACJI KOMPUTEROWEJ STANOWISKA PRASY HYDRAULICZNEJ...	41
KAZIMIERZ SZATKOWSKI WPŁYW RODZAJU ZLECENIA PRODUKCYJNEGO NA SPOSÓB ORGANIZACJI OPROGRAMOWANIA WYCINARKI LASEROWEJ.....	51
JERZY SZERAFIN, PAWEŁ ZAPRAWA ANALITYCZNY OPIS PRZEPŁYWU DYSPERSJI CEMENTOWEJ W PRZEWODACH KOŁOWYCH.....	61
MIRON CZERNIEC, WOŁODYMYR ŻYDYK, JURIJ CZERNIEC SYMULACJA ZUŻYWANIA ŁOŻYSKA ŚLIZGOWEGO Z NIEKOŁOWOŚCIĄ KONTURÓW. CZĘŚĆ 1. UOGÓLNIONY MODEL LINIOWY ZUŻYWANIA.....	76
MIRON CZERNIEC, WOŁODYMYR ŻYDYK, JURIJ CZERNIEC SYMULACJA ZUŻYWANIA ŁOŻYSKA ŚLIZGOWEGO Z NIEKOŁOWOŚCIĄ KONTURÓW. CZĘŚĆ 2. UOGÓLNIONY MODEL KUMULACYJNY ZUŻYWANIA.....	90
TOMASZ GORECKI ANALIZA MOŻLIWOŚCI ADAPTACJI PIECA PEKAT 2 DO HARTOWANIA Z WYKORZYSTANIEM CIECZY POLIMEROWYCH.....	105
TADEUSZ CISOWSKI, ŁUKASZ WOJCIECHOWSKI ŁAŃCUCHY DOSTAW WĘGLA W UJĘCIU PROBABILISTYCZNYM.....	115
TADEUSZ CISOWSKI, ŁUKASZ WOJCIECHOWSKI WYDAJNOŚĆ ŁAŃCUCHÓW DOSTAW WĘGLA.....	135

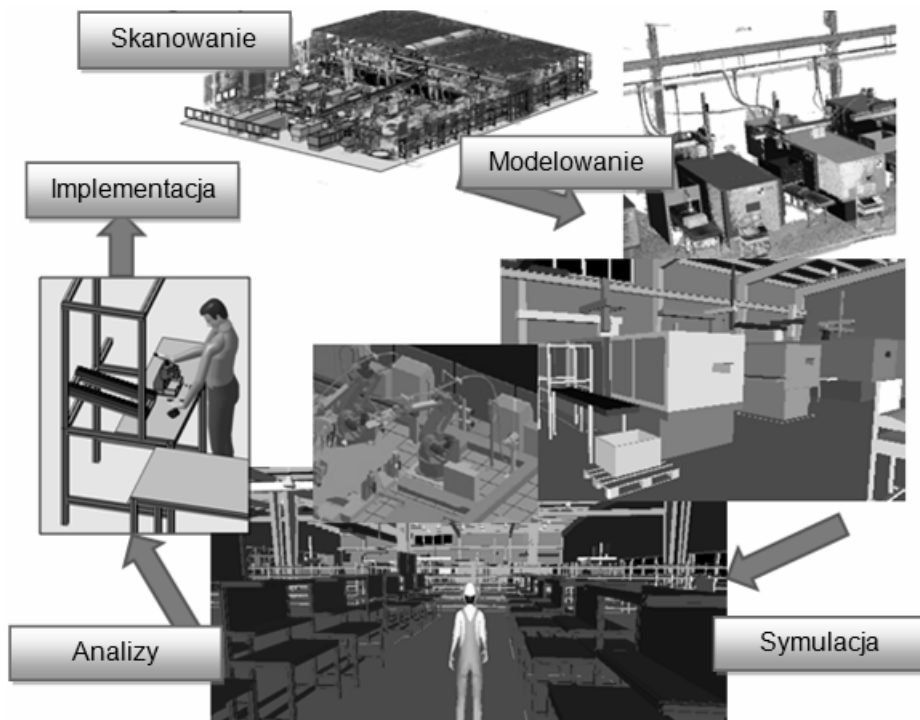
CYFROWA FABRYKA – SKANOWANIE, MODELOWANIE I SYMULACJA FUNKCJONOWANIA SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

Wstęp

Doskonalenie systemów produkcyjnych z wykorzystaniem technologii informatycznych obecnie w przedsiębiorstwach produkcyjnych staje się codzienną praktyką produkcyjną. Pracownicy powinni umieć obsługiwać nie tylko pakiet biurowy, ale również szereg innych programów, które wspomagają np. projektowanie konstrukcji nowych wyrobów, technologii ich wytwarzania, organizowanie przepływów materiałowych, finansowych i informacyjnych. Obecnie również popularne staje się tworzenie tak zwanej cyfrowej fabryki, czyli komputerowego modelu przedsiębiorstwa, który ułatwi podejmowanie decyzji w różnych sytuacjach problemowych dotyczących jego funkcjonowania, ale jest też narzędziem, które ułatwia doskonalenie i rozwój pracowników firmy.

1. Współczesne uwarunkowania działalności przedsiębiorstw produkcyjnych

Dokonujący się postęp techniczny, rozwój technik wytwarzania, środków transportu oraz komunikacji spowodował gwałtowne zmiany w gospodarce. Informacje, pracownicy, materiały, produkty, czy ogólnie kapitał przemieszczają się po całym świecie w coraz większych ilościach i z coraz większą szybkością. Dzisiaj można praktycznie w dowolnym miejscu świata produkować dowolny produkt. Można również zauważyć ukierunkowanie na klienta, skracanie cyklu życia produktów, skracanie czasu przygotowania nowej produkcji, oraz wciąganie klientów w procesy projektowania nowych produktów. Ostatni wymieniony trend wynika z rosnącego wpływu multimediiów na człowieka, kreowania mody i nowych potrzeb. Wynika to również z rozwoju systemów informatycznych związanych z gromadzeniem i przetwarzaniem danych.



Rys. 1. Funkcjonowanie cyfrowej fabryki

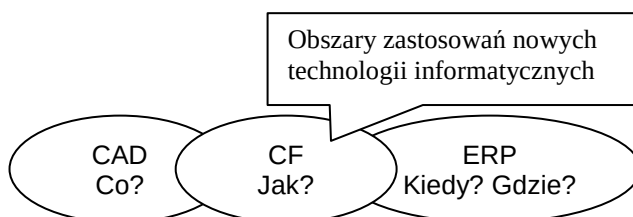
Ewolucja systemów wytwórczych następuje wraz z rozwojem technologii oraz ich bezpośredniego otoczenia w postaci pojawiających się nowych maszyn, urządzeń oraz metod i narzędzi wspomagających prace nad przygotowaniem dokumentacji technicznej, zawierającej opis modelu produktu, procesów i stosowanych środków produkcji. Przedsiębiorstwa produkcyjne są wręcz zmuszone do poszukiwania nowych sposobów poprawy produktywności, zwiększania wydajności produkcji i obniżania jej kosztów. Można to osiągnąć przez stosowanie efektywnych i innowacyjnych koncepcji zarządzania produkcją w rodzaju: Lean Production, Just in Time, Total Quality Management, czy cyfrowej fabryki (Digital Factory) [1, 2, 3].

2. Cyfrowa fabryka

Pojęcie „Cyfrowa fabryka” związane jest z tworzeniem cyfrowego obrazu realnej produkcji. Przedstawia zintegrowane środowisko technologii informatycznej, w których rzeczywistość jest zastąpiona przez wirtualne modele komputerowe. Takie wirtualne rozwiązania umożliwiają weryfikację wszystkich potencjalnych problemowych sytuacji, które mogą się pojawić podczas uruchomienia nowej produkcji.

Alan Christman już w 2003 roku w raporcie CIMdata zdefiniował pojęcie „cyfrowej produkcji” [4], które oznacza zastosowanie modeli 3D CAD oraz powiązanie uzyskanych z nich informacji do celów wizualizacji oraz symulacji procesów produkcyjnych. Głównym celem stosowania takich narzędzi jest ustalenie jak najbardziej efektywnego procesu produkcji w warunkach określonych ograniczeń zasobowych. „Cyfrowa fabryka” wspiera planowanie, analizy, symulację, optymalizację produkcji złożonych produktów i równocześnie stwarza warunki do określania wymagań dla zatrudnionych pracowników.

Takie rozwiązania umożliwiają szybkie wprowadzanie zmian, równoległe wykonywanie prac projektowych przez konstruktorów, technologów, organizatorów produkcji oraz planistów. „Cyfrowa fabryka” stanowi narzędzie integracji systemów CAD z rozwiązaniami klasy ERP co przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Obszary zastosowania oprogramowania związanego z „cyfrową fabryką”

Jedną z ważniejszych możliwości narzędzi „cyfrowej fabryki” jest realizowanie procesu planowania i rozwoju produktu bazując na wspólnej bazie danych [5]. Filarami „cyfrowej fabryki” są trzy następujące elementy:

- cyfrowy opis wyrobu z jego statycznymi i dynamicznymi właściwościami,
- cyfrowy plan realizacji procesu produkcyjnego,
- cyfrowy model systemu produkcyjnego umożliwiający przeprowadzenie różnych analiz pod kątem poprawy wskaźników efektywności realizowanych procesów.

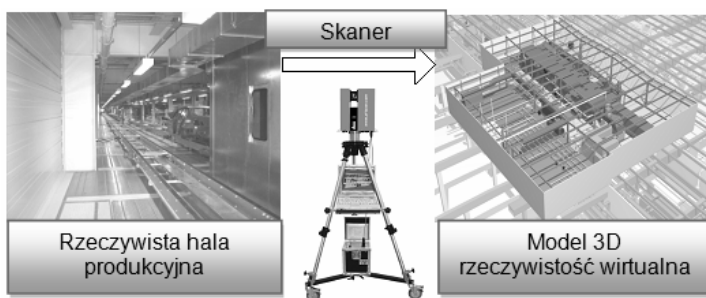
Ważne jest tu jednorazowe pozyskiwanie i wprowadzanie danych, a następnie zarządzanie nimi w postaci zunifikowanych baz, tak aby wszystkie podsystemy oprogramowania były w stanie je wykorzystać. Integracja baz danych to jeden z głównych warunków implementacji cyfrowej fabryki.

3. Skanowanie i modelowanie obiektów przemysłowych

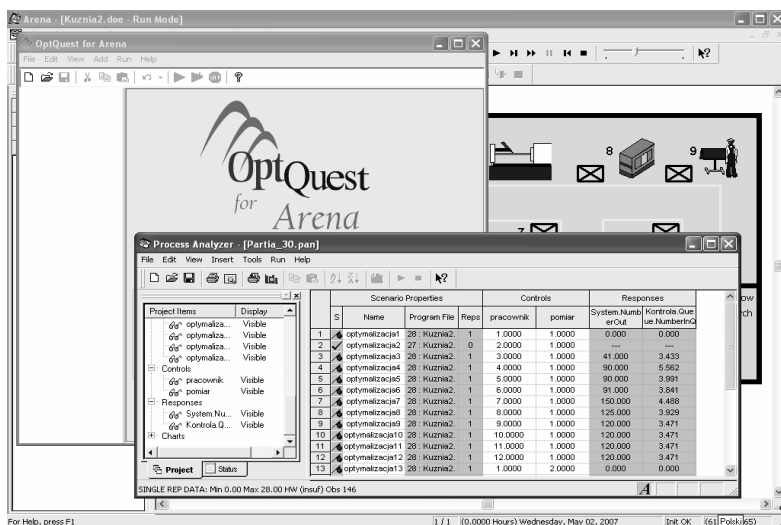
Stworzenie modelu fabryki jest procesem bardzo złożonym i trudnym do realizacji. Jednak dzięki takim modelom uzyskuje się znaczną poprawę komunikacji między zespołami projektowymi, obniżenie ryzyka wywołanego błędnymi decyzjami, przyspieszenie wdrażania innowacji i wzrost efektywności wprowadzanych zmian.

Obecnie dominują jeszcze klasyczne podejścia do digitalizacji systemów produkcyjnych – dominują pomiary z wykorzystaniem taśmy mierniczej lub mierników laserowych. Korzystanie z takich narzędzi sprawia, że digitalizacja całego przedsiębiorstwa jest procesem niezwykle czasochłonnym i kosztownym. Jest to także potencjalne źródło strat, nieścisłości i błędów.

O wiele szybszym i jakościowo lepszym sposobem tworzenia modeli 3D dla istniejących systemów produkcyjnych jest wykorzystanie skanerów laserowych 3D [6] – rys. 3. Sprawiają one, że przekształcenie obecnych rzeczywistych systemów w system wirtualny, który poprawnie odzwierciedla geometrię analizowanej przestrzeni systemu produkcyjnego oraz umożliwia przeprowadzenie różnych analiz komputerowych, jest już kwestią znacznie krótszego okresu.



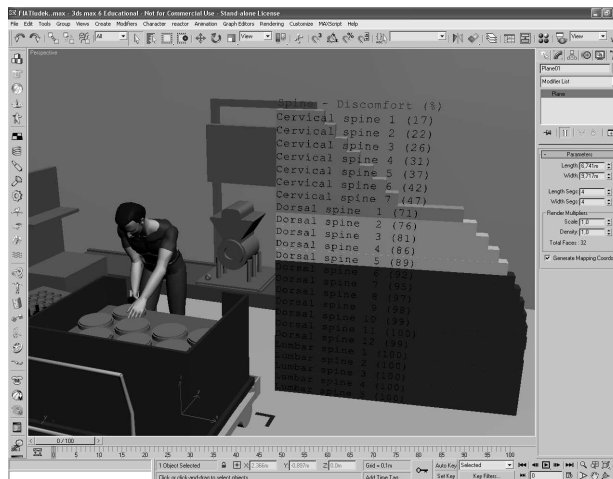
Rys.3. Digitalizacja systemów wytwórczych



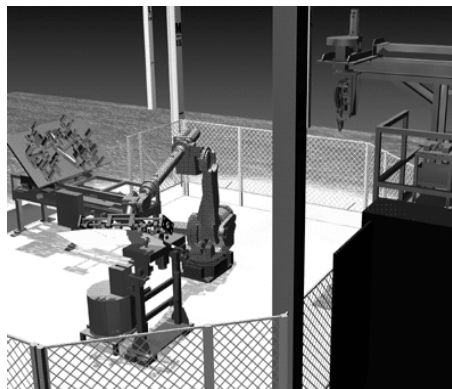
Rys. 4. Symulacja i optymalizacja przepływu materiałowego w pakiecie ARENA

W chwili obecnej system projektowania fabryk w 3D, generowania modeli trójwymiarowych hal produkcyjnych z rozplanowanymi stanowiskami jest jeszcze brakującym elementem w rozwiązaniach cyfrowej fabryki [5]. Jest jednak możliwe stworzenie modelu 3D hali produkcyjnej w systemach CAD i jego zaimportowanie w różnych modułach narzędzi cyfrowej fabryki np. w programie symulacyjnym. Symulacja przepływów materiałowych na tak opracowanym modelu umożliwia optymalizację przemieszczania materiałów, redukcję zasobów oraz stanowi wartość dodaną w zarządzaniu łańcuchem logistycznym [7] – rys.4.

Kolejnym przykładem wykorzystania takich modeli są podsystemy do analiz ergonomii pracy, które wykorzystują międzynarodowe standardowe metody analiz, takie jak NIOSH, RULA, itd., które umożliwiają właściwe zaplanowanie i zweryfikowanie stopnia oddziaływania środowiska pracy na pracownika – rys. 5.

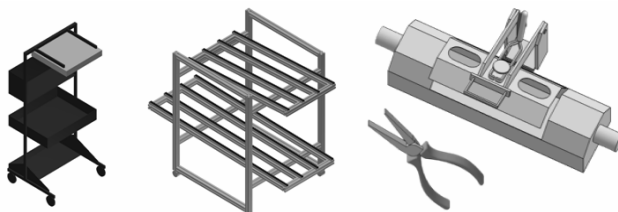


Rys. 5. Wykres obciążenia kręgosłupa wg dyskomfortu



Rys. 6. Wirtualna scena zrobotyzowanego systemu – oprogramowanie Mantra4D [8]

Najwyższy poziom analizy reprezentuje symulacja komputerowa przepływów produkcji i podsystemów, takich jak pojedyncze zrobotyzowane stanowiska pracy – rys 6. Każdy system cyfrowej fabryki zawiera bibliotekę cyfrowych obiektów od obiektów elementarnych aż do złożonych obiektów reprezentujących stanowiska pracy, maszyny i roboty, lub nawet linie produkcyjne. Te wirtualne obiekty są używane przez inżynierów do projektowania wirtualnych systemów [5]. Wybrane przykłady takich wirtualnych obiektów przedstawiono na rysunku 7.



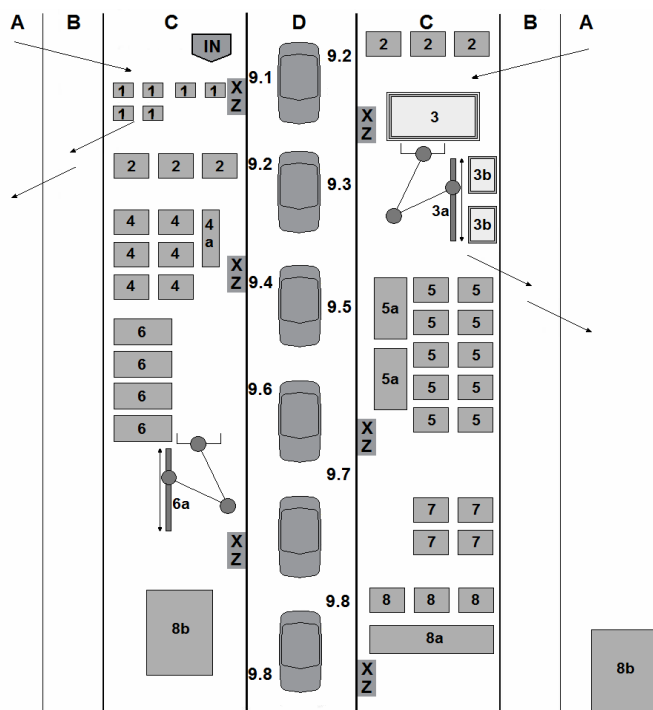
Rys. 7. Biblioteka wirtualnych obiektów

4. Symulacja

Po zamodelowaniu badanego systemu produkcyjnego można na nim przeprowadzić szereg symulacji, które są podstawą dalszych analiz i wyciąganych wniosków. Zamodelowany system produkcyjny można dalej udoskonalać i przeprowadzać kolejne symulacje dla różnych wariantów systemu (nowe maszyny, różna ilość obrabianych części, różne wielkości buforów, przewidywane zakłócenia i możliwe przerwy np. związane z planowanymi remontami maszyn, alternatywne procesy wytwarzania). W przeprowadzanych analizach można dodatkowo uwzględnić koszty inwestycji oraz koszty wytwarzania, które można określić dla różnych wariantów projektowanego systemu [9].

Przedstawiony na rysunku 8 przykład dotyczy montażu samochodów osobowych. Wykonywanie kilku modeli samochodów na jednej linii montażowej zwiększa prawdopodobieństwo błędów popełnianych przez pracowników, powstają przerwy związane z oczekiwaniem na różne części, oraz konieczne jest tworzenie zapasów buforowych w celu zminimalizowania zakłóceń. Czynniki te były przedmiotem analizy, które uwzględniono w opracowanym modelu symulacyjnym [10].

Jedną z przeprowadzonych analiz była analiza kosztów pracy dla zmieniających się warunków produkcyjnych. Założono zróżnicowany system pracy i wynagrodzeń. Zdefiniowano dwie grupy zaszeregowania prac montażowych i związane z nimi wymagane kwalifikacje pracowników (grupy A, B, C, D). Opracowano tabelę podstawowych stawek płac – dla grup zaszeregowania pracowników A, B, C, D ustalono odpowiednio stawki 75, 85, 100, 130 jednostek kosztowych (ze względu na poufność danych nie podano jednostek).



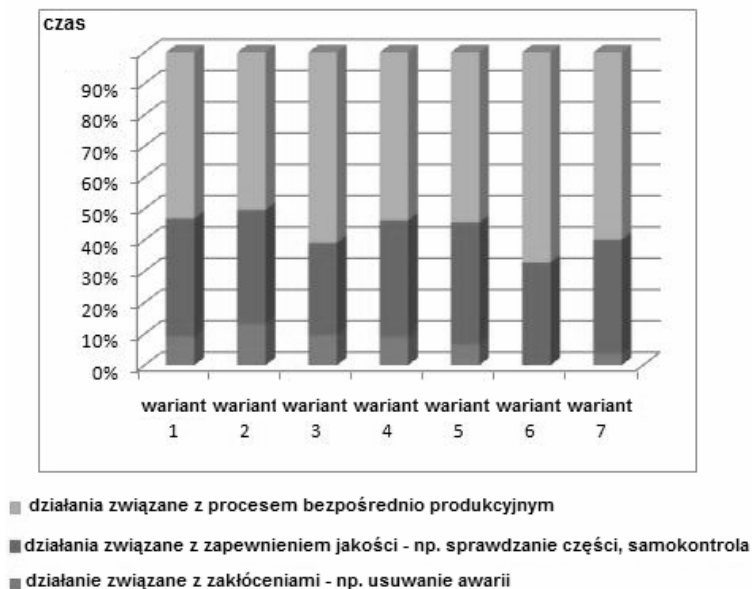
Rys. 8. Fragment modelu analizowanej linii montażu samochodów osobowych [10]

Na niektórych stacjach występują zakłócenia, które generują dodatkowe koszty związane np. z usuwaniem awarii. Po wstępnej analizie okazało się, że sekcja numer 9 linii montażowej, jest szczególnym miejscem, w którym występuje najwięcej postojów związanych z korygowaniem błędów. Najwięcej błędów występuje na stacji roboczej numer 9.8 montażu spojlera i tylnych siedzeń (rys. 8).

Po przeprowadzonej analizie wstępnej stanu obecnego zdefiniowano siedem wariantów różniących się sposobem dostarczania części na linię montażową (utrzymywanie stałych zapasów na stanowiskach, wcześniejsze kompletowanie części w magazynie zgodnie z sekwencją montowanych modeli samochodów) oraz sposobem kontroli wykonanych operacji (kontrola wrywkowa lub pełna, samokontrola, kontrola końcowa). Głównym celem symulacji było znalezienie takiego wariantu, który będzie charakteryzował się najmniejszymi kosztami pracy przy zachowaniu jakości wytwarzania, tj. przy zastosowaniu różnych rozwiązań zapewniających wymaganą jakość.

Przykładowe wyniki z analizy symulacyjnej przedstawiono na wykresie 1. Podobnie, jak przedstawiony na wykresie czas wykonywania różnych działań na stacji roboczej, kształtowała się struktura kosztów tych działań. Efektem końcowym było opracowanie systemu kontroli dla linii produkcyjnej oraz struktury

zatrudnienia spełniającej określony wyżej cel, czyli najniższe koszty przy zapewnieniu wymaganej jakości montażu.



Wykres 1. Przykładowe wyniki z symulacji – struktura czasu pracy dla siedmiu wariantów organizacji pracy na jednej ze stacji roboczych linii montażu samochodów



Rys. 9. Skrócenie czas dostarczenia wyrobu na rynek

5. Wnioski

Zastosowanie narzędzi do skanowania, modelowania i symulacji procesów zachodzących w przedsiębiorstwach produkcyjnych, daje możliwość zaprojektowania systemu pracy zbliżonego do optymalnego pod względem kosztów, czasu realizacji zadań oraz wymagań jakościowych. Zmieniając czynniki wejściowe analizowanego systemu produkcyjnego, na przykład liczbę stanowisk, ich wydajność, wielkość dostaw i czas między dostawami, kolejność i zakres czynności wykonywanych na stanowiskach pracy, można łatwo i szybko zbadać kilka wariantów systemu produkcyjnego i wybrać wariant najlepiej spełniający założone kryterium (najkrótszy czas i największy zysk).

Narzędzia te ułatwiają podejmowanie decyzji dotyczących kształtowania systemów pracy oraz umożliwiają badanie wpływu zmian na wyniki realizacji działań. Obserwacja na ekranie monitora czynności wykonywanych na stanowiskach pracy, obserwacja sposobów manipulacji przedmiotami pracy, sposobu obsługi środków produkcji oraz innych zamodelowanych procesów ułatwia dostosowanie się do nowych stanowisk, szybszą naukę i lepsze zrozumienie różnych aspektów wykonywanych prac.

Szczególnie narzędzia te są przydatne w projektowaniu nowych linii produkcyjnych. Najważniejszą ich zaletą jest możliwość skrócenia czasu dostarczenia nowego wyrobu na rynek – rys. 9. Coraz częściej narzędzia te są również wykorzystywane w bieżącym zarządzaniu jako narzędzia wspomagające analizę przebiegu przepływów: materiału, informacji, zasobów ludzkich i finansów w przedsiębiorstwie. Komputerowe modele mogą integrować działania realizowane na wszystkich szczeblach zarządzania. Efektem takich zastosowań jest powstanie nowej kategorii oprogramowania wspomagającego zarządzanie przedsiębiorstwami produkcyjnymi określanej jako „narzędzia cyfrowej fabryki.

LITERATURA

1. Bubeník P.: Advanced planning system in small business. In: Applied computer science : Management of production processes. - ISSN 1895-3735. - Vol. 7, no. 2 (2011), str. 21-26.
2. Furmann R., Gregor M.: Virtual design– how to be closer to the world class? Informatyka, Organizacja i Zarządzanie. Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2005, pp.35-40.
3. Gregor M., Medvecký Š.: Virtual Reality Reverse Engineering in design of manufacturing systems. W.: Produktivita, No.4, 2005, pp. 2-4.
4. Christman A.: The Benefits of Digital Manufacturing. CIM Data, March 2003.
5. Gregor M., Medvecký Š., Mičieta B., Matuszek J., Hrčková A.: Digital Factory. KRUPA print, Zilina 2007.
6. Gregor M., Budzel F., Štefánik A., Plinta D.: 3D laser scanning in digitization of current production systems. In: 9th IFAC Workshop on intelligent manufacturing systems (IMS'08), International Federation of Automatic Control, Szczecin 2008, pp. 137-144.
7. Krajčovič M. a kolektív: Priemyselná logistika. Univerzitet Žyľiňski/EDIS, Žyľina 2004.
8. Materiały reklamowe i szkoleniowe firm: Rock-well Software, Dassault Systemes, Autodesk.

9. Štefánik A., Gregor M.: Rapid development of the new production system with the support of computer simulation. W.: Rapid technologies., CAMT, Wrocław 2004.
10. Matuszek J., Golińska E.: Work costs management at given workstations of motor car assembly. W.: Automation in production planning and manufacturing : 10th International Scientific Conference, University of Žilina, Slovak Republic, 04.-06.05.2009, str. 186-191.

DIGITAL FACTORY - SCANNING, MODELLING AND SIMULATION OF THE PRODUCTION SYSTEMS FUNCTIONING

Abstract

Improving production systems using information technology is becoming standard now. The main objective of this paper is to characterize how to implement in the design work the computer-based tools of "Digital Factory" – from modeling aided by devices for scanning of industrial buildings, to the complex simulation of manufacturing processes.

Keywords: digital factory, modeling and simulation of production processes

CYFROWA FABRYKA – SKANOWANIE, MODELOWANIE I SYMULACJA FUNKCJONOWANIA SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH

Streszczenie

Doskonalenie systemów produkcyjnych z wykorzystaniem technologii informatycznych obecnie staje się standardem. Głównym celem tego opracowania jest charakterystyka sposobu realizacji prac projektowych opartych na informatycznych narzędziach „cyfrowej fabryki” – od modelowania wspomaganych urządzeniami do skanowania obiektów przemysłowych, do kompleksowej symulacji procesów produkcyjnych.

Słowa kluczowe: cyfrowa fabryka, modelowanie i symulacja procesów produkcyjnych

Dr hab. inż. Dariusz PLINTA, prof. ATH

Mgr inż. Ewa GOLIŃSKA

Katedra Inżynierii Produkcji

Wydział Budowy Maszyn i Informatyki

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

43-309 Bielsk-Biała, ul. Willowa 9

tel./fax.: (0-33) 8279 234

e-mail: dplinta@ath.bielsko.pl

egolinska@ath.bielsko.pl

PROJEKTOWANIE PROCESÓW I SYSTEMÓW OBRÓBKİ W WARUNKACH WSPÓŁBIEŻNEGO ROZWOJU WYROBU

Wstęp

Rozwój wyrobu zgodnie z nowymi strategiami rozwojowymi kładzie nacisk na wykonanie wszystkich niezbędnych faz w cyklu życia wyrobu możliwie równocześnie CE (ang. *Concurrent Engineering*) [1]. W zintegrowanym komputerowo rozwoju wyrobów, procesów i systemów wytwarzania stosowanych jest szereg metod wspomagających działania, które tworzą informację ukierunkowaną na definiowanie wyrobu, procesu i systemu wytwarzania. Jednym z ważniejszych efektów wdrażania systemów produkcyjnych umożliwiających realizację nowoczesnych strategii rozwojowych wyrobów jest skrócenie cykli uruchomień nowych wyrobów oraz przyspieszenie realizacji zamówień.

1. Formalny opis projektowania procesu technologicznego obróbki

Proces technologiczny jest zamierzonym i uporządkowanym ciągiem dyskretnych działań występujących w systemie produkcyjnym w odniesieniu do wyrobu [2]. Stwierdzono, że w procesie technologicznym mogą zachodzić zmiany stanu obiektu (przedmiotu obrabianego) od stanu początkowego do końcowego (proces technologiczny obróbki). Przyjęto także, że proces technologiczny obróbki realizowany przez system wytwarzania jest opisany przez zbiór działań $\{E_0\}$, wykonywanych przez elementy systemu obróbki, w wyniku których następuje dyskretna zmiana charakterystyki przedmiotu ze stanu początkowego w stan końcowy oraz strukturę SPO, która określa kolejność występujących w procesie działań.

$$PTO = \{E_0\}, SPO \quad (1)$$

gdzie: $\{E_0\}$ – zbiór działań obróbkowych,
SPO – struktura procesu technologicznego obróbki.

Analiza procesów technologicznych wskazuje na występowanie trzech rodzajów działań:

- E_{TRO} – działanie powodujące zmianę stanu przedmiotu obrabianego,
- E_{OPO} – działanie powodujące zmianę położenia obiektu w systemie (narzędzia – N, przedmiotu – PO, oprzyrządowania wymiennego – ZPW /ZNW),
- E_{IDO} – działanie porównujące charakterystykę rzeczywistą przedmiotu w odniesieniu do charakterystyki zadanej dokumentacją procesu.

A zatem:

$$PTO = \{E_{TRO}, E_{OPO}, E_{IDO}\}, SPO \quad (2)$$

Projektowanie procesu technologicznego dla określonych danych wejściowych: programu produkcyjnego, charakterystyki przedmiotu obrabianego PO_w określonej zależnością:

$$PO_w = \{C_w, W_w, \Psi_w\} \quad (3)$$

jest twórczym procesem decyzyjnym zmierzającym do określenia uzasadnionej przesłankami technicznymi i ekonomicznymi postaci półfabrykatu PO_p oraz działań realizowanych w systemie wytwarzania prowadzących do przekształcenia półfabrykatu PO_p w wyrób o żądanych charakterystykach PO_w .

Projektowanie procesu technologicznego obróbki obejmuje zatem:

- dobór i projektowanie półfabrykatu,
- opracowanie planu obróbki,
- tworzenie struktury procesu obróbki poprzez dobór metod i środków technicznych do realizacji procesu obróbki,
- opracowanie dokumentacji procesu obróbki.

Struktura procesu technologicznego obróbki określa wyróżnialny układ elementów strukturalnych i ich uporządkowanie uzależnione od:

- charakterystyki geometrycznej przedmiotu obrabianego i właściwości fizyko-mechanicznych materiału,
- postulatu stałego wzrostu w procesie dokładności wymiarowo-kształtowej powierzchni przedmiotu.

W wyniku projektowania powstaje określona struktura procesu technologicznego złożona z szeregu hierarchicznie powiązanych ze sobą elementów [3].

2. Formalny opis projektowania systemu obróbki

W systemie produkcyjnym wyodrębnić można podsystemy funkcjonalne – jednostki produkcyjne JP ; przygotowania produkcji, zaopatrzenia materiałowego, kalkulacji i planowania, wytwarzania a w nich podsystemy niższego rzędu JP_{p-1} np. w podsystemie wytwarzania podsystemy obróbki, montażu itp. Rezultatem projektowania organizacyjnego jest struktura produkcyjna SP systemu:

$$SP = \{JP_p \{JP_{p-1} \{JP_{p-2} \}\}\} \quad (4)$$

gdzie: P – poziom dekompozycji systemu produkcyjnego,
 JP_p – jednostka produkcyjna P -tego poziomu dekompozycji,

Pomiędzy jednostkami produkcyjnymi występują więzi kooperacyjne, transportowe, informacyjne itp. Tak więc system produkcyjny może być opisany za pomocą trójki:

$$SPR = \{SP, WP, \gamma\} \quad (5)$$

gdzie: SP – struktura produkcyjna,
 WP – zbiór więzi, relacji lub związków pomiędzy elementami wynikającymi z powiązań wyrobów, środków i procesów produkcyjnych,
 γ – odwzorowanie na zbiorze jednostek produkcyjnych:

$$\gamma = JP \times JP \rightarrow WP \quad (6)$$

W systemie obróbki powiązania mogą być:

- według faz technologicznych wykonywania wyrobów – występuje wówczas struktura technologiczna,
- według podobieństwa przedmiotowo-konstrukcyjnego – występuje wówczas struktura przedmiotowa.

Hierarchiczną strukturę systemu obróbki, za pracą [4], przedstawia rys. 1.

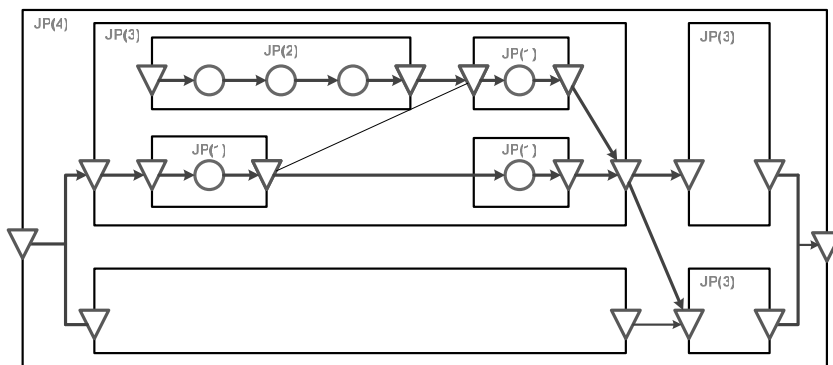
Projektowanie systemu obróbki dla określonych danych wejściowych:

- wynikającego z przyjętego programu produkcyjnego wyrobów, programu wytwarzania elementów składowych wyrobów,
- opracowanych dla zadanych charakterystyk wyrobów struktur procesów technologicznych obróbki SPO ujmujących następstwo realizacji działań obróbki E_{TRO} ,

jest twórczym procesem decyzyjnym obejmującym:

- opracowanie struktury systemu obróbki,
- określenie typu i formy organizacji produkcji,

- dobór środków wytwórczych i określenie czasów operacyjnych,
- ustalenie lokalizacji komórek wytwórczych wraz z rozplanowaniem maszyn i urządzeń,
- przyjęcie zasad sterowania i zarządzania procesem produkcyjnym.



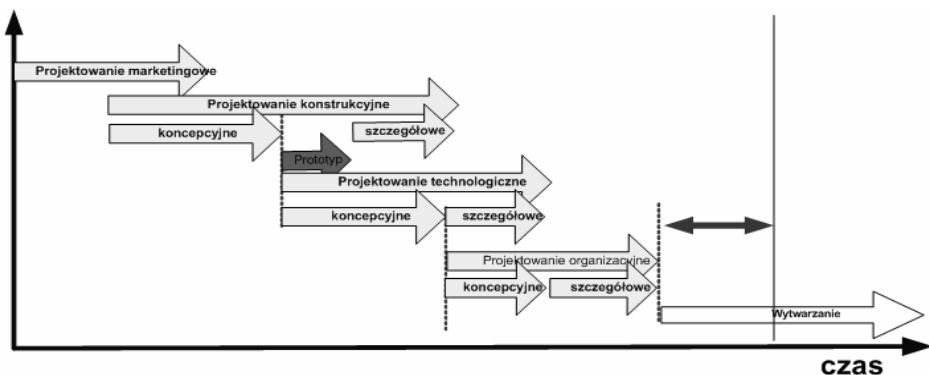
Rys. 1. Hierarchiczna struktura systemu obróbki [4]

Należy także przyjąć sposób podejścia do projektowania komórek wytwórczo-produkcyjnych, który w zależności od rodzaju zadania projektowego może przebiegać [5]:

- od ogólnego projektu procesu wytwórczego do wydzielenia komórek wytwórczych wszystkich stopni – podejście makroorganizacyjne,
- od projektowania procesu wytwórczego w postaci podstawowych komórek wytwórczych a następnie łączenie ich w większe jednostki wyższych stopni.

3. Rozwój koncepcji zintegrowanego projektowania procesów i systemów obróbki

Postęp umożliwiający realizację omawianych strategii rozwojowych w projektowaniu procesów i systemów wytwarzania wskazuje na konieczność integracji realizacji faz rozwojowych wyrobu. Cechy nowoczesnych strategii rozwoju wskazują na potrzebę integracji faz rozwoju wyrobów. Integracja i równoległe wykonywanie działań projektowych zostały osiągnięte przez wydzielenie na poszczególnych etapach rozwojowych projektowania koncepcyjnego, pozwalając na tworzenie rozwiązań wariantowych. Warianty są następnie oceniane w świetle wymagań kolejnej fazy rozwojowej. Wybrany wariant spełniający ustalone kryteria jest następnie rozwijany w fazie projektowania szczegółowego [6]. Fazy rozwoju wyrobów, procesów i systemów obróbki przedstawia rys. 2.



Rys. 2. Równoległa realizacja faz rozwojowych projektowania wyrobów, procesów i systemów obróbki

Działania projektowe powinny być realizowane w odniesieniu do wynikającego z zadanych programów produkcyjnych wyrobów, asortymentu wyrobów obrabianych, które mają być produkowane w projektowanym systemie wytwarzania.

W odniesieniu do koncepcji realizacji faz rozwojowych w podejściu współbieżnego projektowania, przedstawionej na rys. 2, integracja projektowania procesów i systemów technologicznych obróbki wskazuje rys. 3 na konieczność wyodrębnienia czterech faz projektowania.. Są to następujące fazy:

- koncepcyjnego projektowania technologicznego,
- szczegółowego projektowania technologicznego,
- koncepcyjnego projektowania organizacyjnego,
- szczegółowego projektowania organizacyjnego.

3.1. Koncepcyjne projektowanie technologiczne

Celem fazy koncepcyjnej jest określenie, dla zdefiniowanych na etapie projektowania konstrukcyjnego postaci konstrukcyjnych zadanego asortymentu przedmiotów obrabianych, wariantów procesu technologicznego obróbki. Wariantowość procesu technologicznego obróbki wynika z możliwości wykonania części składowych wyrobu (przedmiotów obrabianych) z dopuszczalnego zbioru półfabrykatów z zastosowaniem zróżnicowanych metod i środków wytwarzania. W fazie projektowania procesu technologicznego obróbki realizowany jest:

- wariantowy dobór i projektowanie półfabrykatów,
- dobór metod oraz określenie wariantów struktury procesu technologicznego obróbki,
- analiza technologiczności wyrobu.

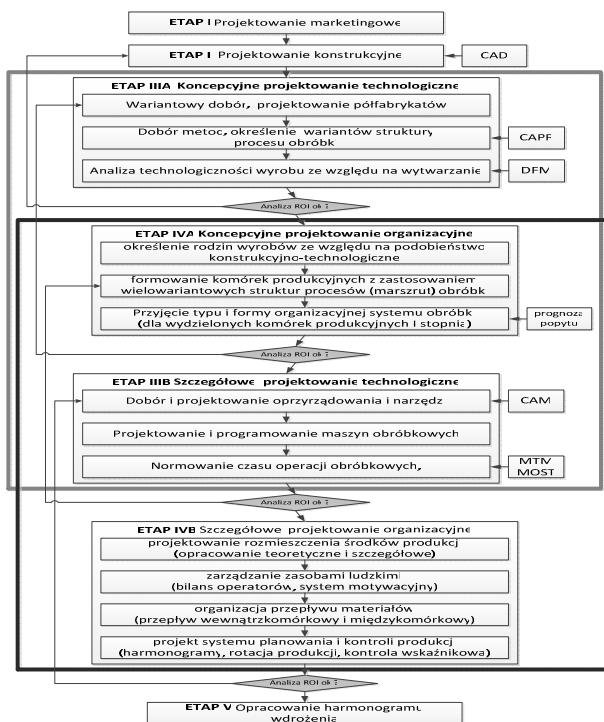
3.1.1. Wariantowy dobór i projektowanie półfabrykatów

Wg [5] kształt przedmiotu obrabianego, rodzaj materiału i sposób wytwarzania pozostają ze sobą w silnej zależności. Właściwości materiału dyktują dobór koniecznych zadań obróbkowych. Dobór półfabrykatów dla wytypowanej rodziny części związany jest z doбором dopuszczalnych metod kształtowania pierwotnego:

- odlewania, wtrysku dla materiałów o niezbyt wysokiej temperaturze topnienia, tworzących ciecz o dostatecznie małej lepkości
- obróbki plastycznej (np. kucia, walcowania, tłoczenia) dla materiałów plastycznych,
- technik proszkowych
- metod specjalnych.

Wybór metody kształtowania pierwotnego jest trudny. Istnieje duża różnorodność metod kształtowania ze często możliwe jest stosowanie różnych metod wytworzenia z równie dobrym lub podobnym skutkiem.

3.1.2. Dobór metod określenie wariantów struktur procesu technologicznego obróbki



Rys. 3. Etapy projektowania technologiczno - organizacyjnego

Zbiór dopuszczalnych metod kształtowania pierwotnego określa zbiór dopuszczalnych półfabrykatów, który stymuluje sekwencję metod kształtowania wtórnego zadań obróbkowych jaką należy zastosować aby przekształcić możliwe do zastosowania półfabrykaty PO_P w wyrób o żądanych charakterystykach PO_W . Jest to związane z tworzeniem wielowariantowej struktury procesu obróbki przedmiotów obrabianych tworzących asortyment wytwarzany w projektowanym systemie wytwarzania. W projektowaniu procesu technologicznego dla określonego przedmiotu projektant posługuje się wzorcem procesu, który determinują metodę projektowania [3]. Bazą dla budowy wzorca procesu technologicznego obróbki jest uogólniona IX fazowa struktura procesu. Struktura procesu technologicznego dla zbioru technologicznie podobnych przedmiotów obrabianych należących do rodziny części wykazuje pewien porządek technologiczny z uwagi na wzrastającą dokładność oraz właściwości fizyko-mechaniczne przedmiotu obrabianego. W przyjętej semigeneracyjnej metodzie projektowania wzorzec tworzony jest na podstawie analizy procesów technologicznych należących do określonej klasy oraz zasady i reguły projektowania – wiedzę technologiczną WT .

$$WT = \{ME_{TRO}, ME_{OPO}, ME_{IDO}\}, MSPO \quad (7)$$

Tworzenie struktury procesu technologicznego obróbki dla przedmiotu obrabianego obejmuje dla ustalonego dopuszczalnego zbioru półfabrykatów zdefiniowanie zadań obróbkowych i ich następstwa prowadzących do przekształcenia półfabrykatów PO_P w gotowy wyrób PO_W co pokazano na rys. 4.

$$ZO = \{ZO_i\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

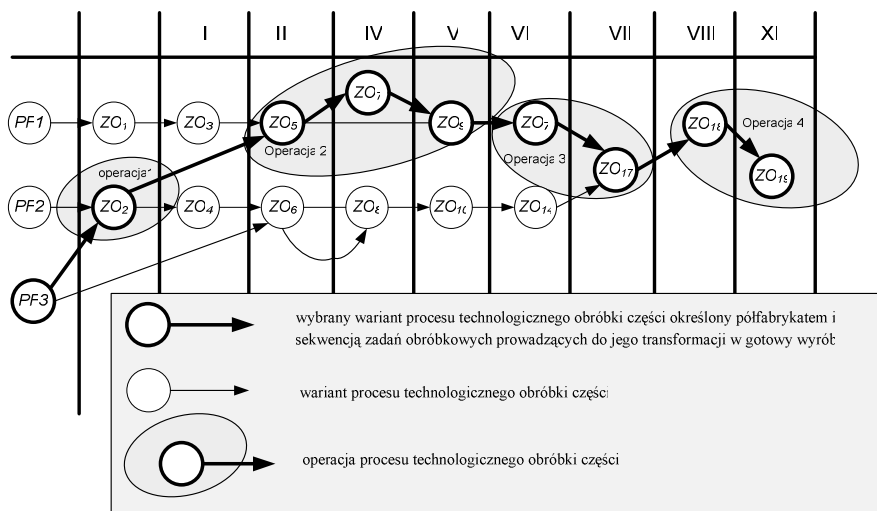
Na etapie koncepcyjnego projektowania technologicznego zadania obróbkowe opisywane są za pomocą modeli działań ME_{TRO} , ME_{OPO} , ME_{IDO} .

Na zbiorze zadań obróbkowych zbudować można graf GON :

$$GON = \{ZO, RN, \nu\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

gdzie: ZO – zbiór zadań obróbkowych,
 RK – relacja następstwa określona na zbiorze zadań obróbkowych,
 ν – odwzorowanie na zbiorze zadań obróbkowych:

$$\nu : ZO \times ZO \rightarrow RN \quad (10)$$



Rys. 4. Graf następstwa zadań obróbkowych

3.1.3. Analiza technologiczności wyrobu

W oparciu o zdefiniowane warianty realizacji procesu obróbki wyrobu przeprowadzana jest analiza technologiczności wyrobu ze względu na obróbkę (DFM), która ujmuje dla każdego dopuszczalnego wariantu:

- generowanie stanów pośrednich przedmiotu obrabianego [3],
- szacowanie czasu wytwarzania,
- szacowanie kosztów wytwarzania.

Uzyskane wyniki są podstawą do przeprowadzenia w trybie sprzężenia zwrotnego korekty postaci konstrukcyjnej wyrobu. Efektem prowadzonych analiz jest ustalona postać i struktura konstrukcyjna wyrobu oraz wybrany wariant procesu technologicznego obróbki części określony półfabrykatem i sekwencją zadań obróbkowych prowadzących do jego transformacji w gotowy wyrób. Na wybranym wariantie przeprowadzane jest grupowanie zadań obróbkowych w operacje technologiczne. Uzyskane warianty procesu technologicznego obróbki elementów składowych wyrobu opracowane ze stopniem szczegółowości pozwalają na przeprowadzenie niezbędnych obliczeń organizacyjnych.

3.2. Konceptyjne projektowanie organizacyjne

W etapie konceptyjnego projektowania organizacyjnego systemu obróbki, wymagana jest znajomość następujących danych wejściowych:

- programów produkcyjnych lub wielkości produkcji dla poszczeg. części,
- alternatywnych marszrut technologicznych poszczególnych części.

W etapie koncepcyjnego projektowania organizacyjnego systemu obróbki nie jest wymagana znajomość czasów trwania poszczególnych operacji technologicznych. Wynika to z faktu, iż w pierwszej kolejności należy ustalić strukturę systemu obróbki poprzez wydzielenie komórek produkcyjnych I stopnia. Zgodnie z tendencją wydzielania w pierwszej kolejności komórek o specjalizacji przedmiotowej (w skrócie komórek przedmiotowych jako linii produkcyjnych lub gniazd o specjalizacji przedmiotowej) należy dążyć do opracowania takiej struktury systemu obróbki, aby w świetle schematycznej prezentacji takiego systemu, przepływ produkcji był jak najmniej skomplikowany (brak nawrotów, skrzyżowań dróg przepływu, itd.). Dąży się przy tym do równomiernego obciążenia wydzielonych komórek przedmiotowych produkcją według ogólnie panujących zasad organizacji procesu produkcyjnego [7].

Zamknięcie w wydzielonych komórkach przedmiotowych produkcji wybranych przedmiotów produkcji daje możliwość uproszczenia przepływu produkcji. Stąd jednym z najważniejszych zadań w etapie koncepcyjnego projektowania organizacyjnego systemu obróbki jest utworzenie rodzin wyrobów według podobieństwa konstrukcyjno-technologicznego a następnie przydział maszyn obróbkowych do produkcji rodziny wyrobów w zamkniętym (często odizolowanym) otoczeniu jakim staje się właśnie komórka przedmiotowa [8].

Głównym problemem naukowym w etapie koncepcyjnego projektowania organizacyjnego systemu obróbki jest opracowanie modelu matematycznego związanego z wydzieleniem komórek przedmiotowych. Celem jest najczęściej osiągnięcie minimalnej drogi przepływu międzykomórkowego (pomiędzy wydzielonymi komórkami przedmiotowymi) i wewnątrzkomórkowego (wewnątrz poszczególnych komórek przedmiotowych) produkcji [9]. Ze względu na brak znajomości (w etapie koncepcyjnego organizacyjnego projektowania systemu obróbki) zarówno fizycznej alokacji maszyn obróbkowych jak i fizycznego rozmieszczenia komórek przedmiotowych w systemie obróbkowym, zadanie ogranicza się do wyznaczenia długości dróg przy założeniu, że odległości dróg międzykomórkowych są jednakowe. Takie samo ograniczenie ma zastosowanie do dróg wewnątrzkomórkowych, które są uważane jako drogi o tej samej długości [10]. Większa część prac naukowych skupia uwagę na tych ograniczeniach, traktując zarazem programy produkcyjne poszczególnych części jako tej samej wielkości. Takie uproszczenie daje możliwość pominięcia w modelu matematycznym zagadnienia zróżnicowania zapotrzebowania.

Problemem jest natomiast wybór jednej spośród alternatywnych marszrut technologicznych obróbki poszczególnych części. Problem nabiera większego znaczenia gdy w modelu uwzględni się różną wielkość produkcji poszczególnych części. Jest to problem optymalizacyjny wielokryterialny, posiadający sprzeczne ze sobą kryteria optymalizacyjne, do których należą minimalizacja dróg przepływu produkcji (według powyższego opisu), minimalizacja liczby maszyn, maksymalizacja (wyrównoważenie) obciążenia stanowisk roboczych [11]. Pewnym uproszczeniem jest przyjęcie założenia, iż tworzone komórki

przedmiotowe powinny zawierać maszyny obróbkowe określonych typów w liczbie mieszczącej się w pewnym zakresie. Takie samo założenie jest przyjmowane dla części, które mogą być grupowane w rodziny o liczebności w pewnych założonych granicach [12].

Wynikiem koncepcyjnego projektowania organizacyjnego systemu obróbki jest:

- zbiór wydzielonych komórek produkcyjnych I stopnia,
- ustalenie rodzin wyrobów produkt. wewnątrz komórek przedmiotowych,
- na podstawie ustalonych rodzin wyrobów oraz na podstawie znanego programu produkcyjnego rodzin wyrobów, dla każdej, wydzielonej komórki produkcyjnej szacunkowo przyjęta odmiana organizacji produkcji.

Odmianę organizacji produkcji przyjmuje się szacunkowo, gdyż na tym etapie projektowania organizacyjnego nie jest ustalona ostateczna liczba instancji maszyn obróbkowych wewnątrz komórek produkcyjnych I stopnia. Typ organizacji produkcji jest dobierany na podstawie sumarycznej wartości programu produkcji rodziny wyrobów. Dzięki temu jest możliwe ustalenie wartości spływu produkcji wyrażonej za pomocą taktu klienta lub pożądanego czasu cyklu dla poszczególnych części lub rodzin wyrobów. Natomiast forma organizacji produkcji jest szacowana na podstawie przyjętego wariantu marszruty technologicznej części (bez znajomości czasu jednostkowego).

Wymagany jest system ekspertowy, którego zadaniem na tym etapie jest oszacowanie czasu jednostkowego, aby z pewnym przybliżeniem sprawdzić możliwość zastosowania danej formy potokowej organizacji produkcji. Przyczynia się to do wstępnego zdefiniowania wymagań dotyczących projektowanego oprzyrządowania technologicznego, ponieważ wskazuje miejsca i wymaganą specjalizację oprzyrządowania w celu zachowania płynnego przepływu wewnątrzkomórkowego (poprzez np. systemy automatycznego odmocowania części na maszynach, lub konstrukcję oprzyrządowania umożliwiającą szybkie przezbrowanie maszyny).

3.3. Szczegółowe projektowanie technologiczne

Działania projektowe ujmują szereg działań projektowych prowadzących do opracowania kart instrukcyjnych operacji obróbki:

- dobór i projektowanie urządzeń obróbczych i wyposażenia technologicznego przedmiotowego i narzędziowego stanowiska,
- określenie struktury operacji obróbki, generowanie ustawień, pozycji, zabiegów i parametrów technologicznych,
- opracowanie programów sterujących dla operacji realizowanych na urządzeniach programowalnych,
- określenie składników normy czasu operacji obróbki.

Wyniki są podstawą wyboru wariantu organizacyjnego stanowiska wytwarzania i podstawą realizacji fazy szczegółowego projektowania organizacyjnego.

3.4. Szczegółowe projektowanie organizacyjne

Biorąc pod uwagę szczegółowe projektowanie organizacyjne systemu obróbki należy uwzględnić czynniki mogące zaważyć na powodzeniu lub porażce przedsięwzięcia w trakcie eksploatacji tak zaprojektowanego systemu. Czynniki te dzieli się na dwie grupy, które w formalnym opisie systemu wytwórczego stanowią atrybuty opisujące jego stan konfiguracyjny i funkcjonalny. Można wydzielić dwie podstawowe grupy atrybutów, tj. atrybuty twarde oraz atrybuty miękkie. Atrybuty twarde, stanowiące dane wejściowe w etapie szczegółowego projektowania organizacyjnego, są to atrybuty dotyczące kwestii alokacji i konfiguracji zasobów w wydzielonych komórkach produkcyjnych. Do atrybutów twardych zalicza się:

- stosowaną technologię (zastos. środki produkcji, w tym maszyny, oprzyrządowanie, narzędzia, materiały, urządzenia pomocnicze), zaprojektowane w fazie szczegółowego projektowania technologicznego ze znormowanymi czasami jednostkowymi oraz przygotowawczo-zakończeniowymi,
- rozmieszczenie środków produkcji (znana jest struktura systemu produkcyjnego, wydzielone są rodziny wyrobów), zaprojektowane w fazie koncepcyjnego projektowania organizacyjnego,
- wielkość produkcji dla rodzin wyrobów, jako wielkości zadane na wejściu.

Atrybuty miękkie podlegają obliczeniu w fazie szczegółowego projektowania organizacyjnego systemu obróbki. Są to atrybuty dotyczące kwestii zarządzania i organizacji produkcji w komórkach produkcyjnych I stopnia. Szczegółowe opracowania organizacyjne skupiają się na zagadnieniach:

- Rozmieszczenia środków produkcji. Znając czasy jednostkowe wyrobów produkowanych wewnątrz komórki produkcyjnej I stopnia istnieje możliwość obliczenia właściwej liczby maszyn alokowanej w takiej komórce. Posługując się znanymi metodami rozmieszczenia teoretycznego i szczegółowego maszyn możliwe jest takie ich ustawienie, aby droga przepływu materiałów wewnątrz komórki była jak najkrótsza [4].
- Zarządzania zasobami ludzkimi. W tym zagadnieniu należy opracować system pracy zespołowej (np. produkcja wielowarsztatowa, zamienność funkcji), którego celem jest równomierny podział pracy w komórce produkcyjnej jak i system motywacyjny (macierz kompetencji, hierarchia pracy w grupie, audyt), którego właściwe zaprojektowanie decyduje o uzyskaniu wysokiego poziomu wydajności produkcji w komórce produkcyjnej I stopnia [13].
- Organizacji przepływu materiałów. Szczegółowemu projektowaniu podlega opracowanie podsystemu przepływu materiałów wewnątrz komórek produkcyjnych I stopnia jak również system zasilania komórek produkcyjnych I stopnia w przedmioty pracy (międzykomórkowy system przepływu materiałów). Należy zaprojektować trasy przepływu materiału oraz miejsca buforowe służące do składowania zapasów produkcji w toku.

Organizacja przepływu materiałów podlega procesowi ciągłego doskonalenia przy zachowaniu cech standaryzacji produkcji wewnątrz całego systemu produkcyjnego.

- Planowania i kontroli produkcji. Znając czasy przygotowawczo-zakończeniowe wyrobów produkowanych wewnątrz komórki produkcyjnej I stopnia istnieje możliwość zaplanowania sekwencji oraz rotacji produkcji dla poszczególnych wyrobów w rodzinie wyrobów. Projektowaniu podlega system harmonogramowania produkcji w komórkach (np. według strategii poziomowanej produkcji, system harmonogramowania job-shop, itd.) oraz kontroli produkcji na poziomie operacyjnym (w celu liczenia kluczowych wskaźników produkcyjnych takich jak OEE, skuteczność, opóźnienia, itp.).

Opisany proces zintegrowanego rozwoju wyrobu przebiega w sposób iteracyjny. Na rys. 3 pokazano miejsca, w których istnieje możliwość powrotu do wcześniejszej fazy projektowania aby dokonać wymaganych zmian. Ze względu na rozwojowy charakter metodyki zintegrowanego projektowania technologicznego i organizacyjnego systemów obróbki, podstawowym wskaźnikiem decyzyjnym umożliwiającym kontynuację prac projektowych lub dokonanie modyfikacji w fazach już zrealizowanych jest wskaźnik ROI (zwrotu z inwestycji). Obliczenia ROI powinny być wykonywane kilkakrotnie ze względu na zachodzące zmiany w projekcie. Przebieg tworzenia kolejnych wersji wyrobu, procesu i systemu wytwarzania będzie weryfikowany z zastosowaniem aplikacji PLM.

4. Wnioski

Zarządzanie cyklem życia wyrobu jest strategicznym podejściem do tworzenia i zarządzania kapitałem intelektualnym związanym z cyklem życia wyrobu umożliwiającym realizację strategii współbieżnego rozwoju wyrobu CE. Prace badawcze prowadzące do osiągnięcia wyższego poziomu integracji i automatyzacji konstrukcyjnego, technologicznego i organizacyjnego przygotowania produkcji są ukierunkowane na budowę zintegrowanego systemu pozwalającego na realizację dynamicznego rozwoju wyrobu z mechanizmami gromadzenia i wykorzystywania zdobywanej w wyniku doświadczeń i specjalistycznej wiedzy. System taki powinien pozwalać na twórcze kształtowanie kolejnych wersji wyrobów, procesów oraz systemów wytwarzania oraz ich weryfikacji i oceny stymulując kierunki rozwoju stosownie do zmieniających się w czasie warunków rynkowych. Prace w tym kierunku będą kontynuowane.

LITERATURA

1. Chlebus E.: Procesowo zorientowany rozwój produktu i procesów w środowisku narzędzi IT. Materiały Konferencyjne – Automatyzacja Produkcji, Prace Naukowe ITMiAP Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
2. Duda J.: Wspomagane komputerowo generowanie procesów wytwarzania – obecny stan i perspektywy rozwoju, III Forum Integracyjne Polskiego Stowarzyszenia Upowszechniania Komputerowych Systemów Inżynierskich Proca, Jedlnia 2004.
3. Duda J.: Rozwój metod projektowania procesów technologicznych obróbki. Rozdział w monografii: *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, pod red. R. Knosala, Zakopane 2013.
4. Santarek K., Strzelczak S.: Elastyczne systemy produkcyjne. Wydawnictwo WNT Warszawa 1989.
5. Durlik I.: Inżynieria zarządzania, część I. Strategie organizacji produkcji. Nowe koncepcje zarządzania. Wydawnictwo Placet, Warszawa 2004.
6. Duda J.: Modelling of concurrent development of the products, processes and manufacturing systems in product lifecycle context. Rozdział w monografii: *New Trends in Technologies*. Rijeka: SCIYO, 2010.
7. Brzeziński M.: Organizacja i sterowanie produkcją. Wydawnictwo Placet, Warszawa 2002.
8. Wojakowski P.: Cell formation problem – state of the art. Rozdział w monografii: *Production Systems-Selected Issues-Theory and Practice*, pod red. M. Fertsch, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2011, str. 69-84.
9. Arkat J., Hosseini L., Farahani M.H.: Minimization of exceptional elements and voids in the cell formation problem using a multi-objective genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, 2011, str. 9597-9602.
10. Caux C., Bruniaux R., Pierreval H.: Cell formation with alternative process plans and machine capacity constraints: A new combined approach. *International Journal of Production Economics* 64 2000, str. 279-284.
11. Ghosh T., Sengupta S., Chattopadhyay M., Dan P.K.: Metaheuristics in cellular manufacturing: A state-of-the-art. *International Journal of Industrial Engineering Computations* 2 2011, str. 87-122.
12. Naadimuthu G., Gultom P., Lee E.S.: Fuzzy clustering in cell formation with multiple attributes. *Computers and Mathematics with Applications* 59, 2010, str. 3137-3147.
13. Chakravorty S. S., Hales D.N.: The evolution of manufacturing cells: An action research study. *European Journal of Operational Research* 188 2008, str. 153-168.

DESIGN OF MANUFACTURING PROCESS AND SYSTEM WITH THE USE OF CONCURRENT ENGINEERING

Abstract

The paper describes the idea of integrated machining process and system planning. Subsequent development stages of the conceptual design as well as detailed design for machining process and system planning are distinguished. The development stages of conceptual and detailed design are carried out based on the concurrent engineering principles.

Keywords: concurrent engineering, product development, integrated manufacturing process and system design

PROJEKTOWANIE PROCESÓW I SYSTEMÓW OBRÓBK W WARUNKACH WSPÓŁBIEŻNEGO ROZWOJU WYROBU

Streszczenie

W referacie przedstawiono koncepcję zintegrowanego projektowania procesu i systemu obróbkowego. Wyodrębniono i opisano fazy rozwoju koncepcyjnego i szczegółowego projektowania technologicznego i organizacyjnego, których realizacja warunkuje współbieżny rozwój wyrobu.

Słowa kluczowe: inżynieria współbieżna, rozwój wyrobu, zintegrowane projektowanie procesów i systemów

Dr hab. inż. Jan DUDA prof. PK

Dr inż. Paweł WOJAKOWSKI

Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji

Politechnika Krakowska

31-864 Kraków, al. Jana Pawła II 37

tel./fax.: (12) 374 32 84 / (12) 374 32 02

e-mail: duda@mech.pk.edu.pl

pwojakowski@pk.edu.pl

PROJEKTOWANIE ZROBOTYZOWANEGO PODSYSTEMU TRANSPORTU I MANIPULACJI DLA ZAUTOMATYZOWNYCH ELASTYCZNYCH SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH. ZARYS PROBLEMATYKI.

Wstęp

Zautomatyzowane elastyczne systemy produkcyjne (ZESP) powinny charakteryzować się dużymi możliwościami wytwórczymi, niezawodnością i elastycznością. W procesie projektowania tych systemów podstawowym zadaniem staje się wybór odpowiednich urządzeń technologicznych. Każde urządzenie powinno być wybrane tak, żeby urządzenia tworzyły wspólnie pracującą całość, uzupełniały się, dawały możliwość rozbudowy i jednocześnie zapewniały odpowiedni poziom niezawodności i elastyczności produkcji. Wiele badań w tym obszarze zostało już przeprowadzonych. Przykładem mogą być przedstawione w pracach [1] [2] interesujące metody wyboru obrabiarek dla podsystemu maszynowego ZESP oraz metody wyboru chwytaków. Można jednak zaobserwować braki w metodach wyboru robotów i urządzeń dla podsystemu transportu i manipulacji. Nie ma również zawansowanego narzędzia wspomagającego ich wybór w systemie komputerowego projektowania ZESP. Jak pokazują wyniki badań realna rola pracowników inżynierskich w podjęciu ostatecznej decyzji o wyborze danego urządzenia kształtuje się na poziomie około 6% – reszta (94%) należy do kadry zarządzającej [3]. Dane te wskazują na potrzebę budowy narzędzi wspomagających w procesie projektowania ZESP wybór urządzeń technologicznych w tym robotów.

Najprościej wymagania dla komputerowego wspomagania wyboru urządzeń dla ZSEP można sformułować następująco. System powinien wybrać urządzenia realizujące procesy technologiczne dla wymaganych scenariuszy produkcji, łatwe do przebrojenia oraz zapewniające systemowi produkcyjnemu odpowiedni poziom elastyczności i niezawodności.

Nowoczesny elastyczny lub rekonfigurowany system produkcyjny powinien reagować szybko na wymagania rynku. Konieczne wydają się więc zmiany

wielu paradygmatów produkcji, które dzisiaj nie odpowiadają wymaganemu poziomowi zmienności produkcji [12]. Doskonalenie rozwiązań pozwalających projektować, budować oraz eksploatować ZESP o wysokim poziomie innowacyjności staje się jednym z kluczowych elementów pozycji rynkowej przedsiębiorstw przemysłowych. W konsekwencji nadal aktualne jest prowadzenie prac, również naukowych, zmierzających do opracowania nowych uwzględniających nowoczesne technologie metod projektowania i budowy ZESP oraz dostosowywania istniejących systemów do aktualnych potrzeb zmiennej elastycznej produkcji.

Jednym z kierunków badań w obszarze projektowania i budowy ZESP jest opracowanie i wdrażanie koncepcji tzw. cyfrowej fabryki („Digital Factory”) wykorzystującej na każdym etapie cyklu życia wyrobu zaawansowane technologie informatyczne.

1. Zadania dla przyszłych prac badawczych

W koncepcji „Digital Factory” mieści się również komputerowe wspomaganie procesu projektowania ZESP w tym optymalny wybór urządzeń i ich konfiguracji.

Dzięki zastosowaniu w systemach produkcyjnych sterowanych komputerowo maszyn technologicznych, urządzeń transportu i manipulacji oraz ograniczeniu obsługi operatorskiej można uzyskać:

- skrócenie czasu przebiegu procesu produkcyjnego od 50 do 70%,
- zmniejszenie czasu obróbki od 20 do 50%,
- szybszą reakcję na wymagania rynku, przy równoczesnym wzroście produktywności od 200 do 400%,
- oszczędności maszyn i innego wyposażenia technicznego w stosunku do tradycyjnych form organizacji systemów produkcyjnych od 30 do 70%, [4].

Mimo długoletnich prac badawczo-rozwojowych dotyczących budowy i eksploatacji elastycznych systemów produkcyjnych nie została dotąd opracowana kompleksowa metodologia projektowania ZESP [5]. W procesie projektowania ZESP wykorzystywane są programy przetwarzające dane o produkcji, technologii i scenariuszach produkcji oraz systemy do symulacji i zarządzania produkcją. Problematyka ta cieszy się nadal niesłabnącym zainteresowaniem zarówno w kraju, jak i na świecie, i jest obecnie jednym z ważnych kierunków prac badawczych w inżynierii produkcji oraz automatyce i robotyce [6]. Wiele pytań dotyczących projektowania, budowy i eksploatacji zautomatyzowanych elastycznych systemów produkcyjnych pozostaje nadal bez ostatecznej odpowiedzi. Pozwala to sformułować wymienione niżej nie w pełni rozwiązane zagadnienia [7] [8]:

- sposoby reagowania systemów na zmiany produkcji oraz ich wdrażanie (zaprojekt. elastyczność, zdolność do adaptacji przez rekonfigurację itp.),
- sprzętowe i programowe technologie wspomagające elastyczne automatyzowanie procesów produkcyjnych,

- projektowanie maszyn, systemów i sposobów kontroli zorientowanych na elastyczności i zmianę konfiguracji,
- złożoność pomiarów ich redukcja i techniki zarządzania nimi,
- integracja oprogramowania,
- skalowalność systemów (rozbudowa i redukcja),
- zastosowanie technologii grupowych.
- metody określania wymaganego poziomu elastyczności dla różnych zastosowań,
- metody i narzędzia wspomagające wdrażanie zmian produkcji, takie jak: logistyka, planowanie scenariuszy produkcji, planowanie procesów, planowanie narzędzi i oprzyrządowania,
- zasady zmienności produkcji i powiązanie z nią elastyczność i rekonfiguracji systemów produkcyjnych (częstotliwość zmian i rekonfiguracji),
- powiązanie zmienności i rekonfiguracji z czynnikami jakościowymi, w tym kwestie związane z czynnikiem ludzkim,
- płynne i optymalne przejście pomiędzy zmienianymi systemami,
- cykl życia modeli ekonomicznych oraz uzasadnienie ich paradygmatów.

Wyniki analiz i badań przynoszą wymierne korzyści przez:

- wzrost wydajności powodowany optymalnym wyborem urządzeń i ich lepszym wykorzystaniem,
- zmniejszenie wydatków na urządzenia.

2. Zarys budowy modułu wyboru robotów i urządzeń manipulacji dla system komputerowego projektowania podsystemu transportu i manipulacji ZESP.

2.1. Budowa modelu i bazy danych

W procesie projektowania nowoczesnych systemów produkcyjnych rozwiązywane są problemy, które nie występowały przy projektowaniu systemów tradycyjnych. Dotyczy to zwłaszcza automatyzacji procesów transportu i manipulacji przez zastosowanie robotów i maszyn manipulacyjnych. We współczesnych systemach produkcyjnych przemieszczanie przedmiotów i manipulacja realizowane są w dużej części przez roboty, stąd systemy w których roboty są podstawowym urządzeniem przemieszczania i manipulacji nazywane są systemami zrobotyzowanymi.

Przy wyborze robota do pracy w zrobotyzowanym systemie produkcyjnym uwzględniane są dane charakteryzujące warunki pracy robota. Są to dane opisujące: wyroby podlegające przemieszczaniu i manipulacji, technologię przemieszczania i manipulacji, scenariusze produkcji i warunki środowiskowe.

Dane te określają wymagania stawiane robotom i innym urządzeniom przez technologiczne procesy przemieszczania i manipulacji. Przetwarzanie tych danych i danych charakteryzujących produkcyjne możliwości robotów i urządzeń manipulacyjnych pozwala wybrać roboty i urządzenia najlepiej zaspokajające wymagania procesów transportu i manipulacji. Niżej przedstawiono wybrane grupy danych wykorzystywanych do wyboru robotów.

Dane charakteryzujące wymagania procesów manipulacji:

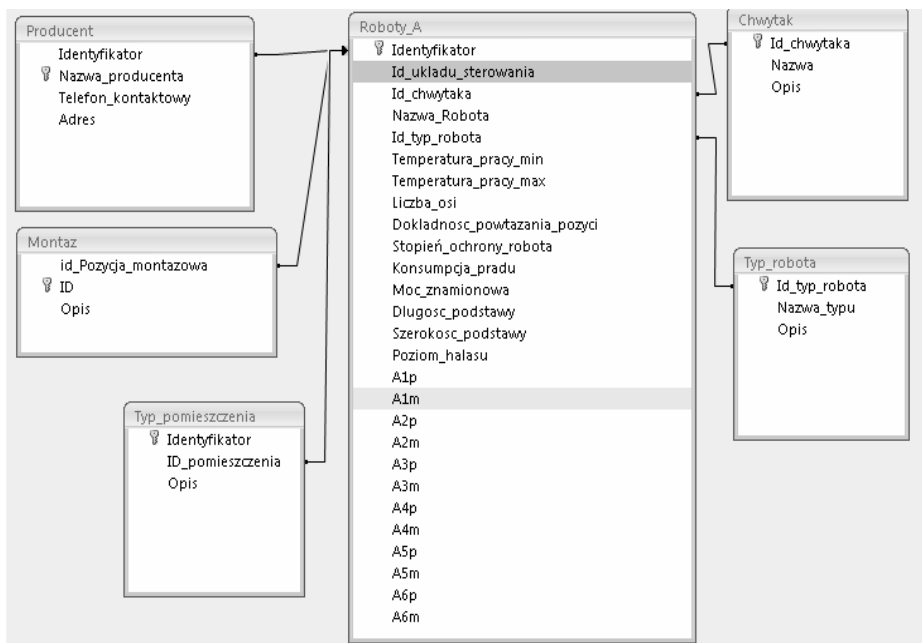
- atrybuty wyrobu (gabaryty, ciężar, charakterystyczne wymiary)
- wymagana przestrzeń robocza, charakterystyczne wymiary robotyzowanego gniazda lub systemu,
- realizowane operacje manipulacji i orientacji,
- trajektoria przemieszczenia i manipulacji,
- wielkość produkcji i scenariusze produkcji.

Dane charakteryzujące roboty i urządzenia manipulacji:

- obsługiwana przestrzeń robocza, zasięg przemieszczeń ramion robota,
- sterowane osie,
- dokładność pozycjonowania,
- udźwig, gabaryty, ciężar,
- mocowanie.

Istotnym parametrem jest możliwość współpracy robota z obrabiarką lub innym urządzeniem zewnętrznym, pozwalająca na przyjmowanie przez robota sygnałów o skończonej pracy, o udostępnieniu przestrzeni roboczej obrabiarki, o konieczności wymiany chwytaka itp.

Przedstawione wyżej dane stanowią część danych, które służą do budowy zintegrowanego modelu danych i bazy danych dla systemu komputerowego projektowania podsystemu transportu i manipulacji. Rys. 1 przedstawia fragment bazy danych.



Rys. 1. Przykład fragmentu bazy danych robotów

2.2 Uwarunkowania wyboru robota i urządzeń manipulacyjnych

Na wybór robota ma wpływ wiele czynników, które uwzględniane są w budowie algorytmów będących podstawą programów wyboru robotów i urządzeń manipulacyjnych.

Na początku należy odpowiedzieć na pytanie dotyczące spełnienia przez roboty i urządzenia zapisane w bazie danych kryteriów przydatności do pracy w wymaganym środowisku przemysłowym. Nie wszystkie roboty mogą mieć możliwości montażu na ścianie, suficie, tak jak wymagają tego względy technologiczne bądź logistyczne. Niektóre z nich nie są dostosowane do pracy w środowisku przemysłowym, w którym występuje pole elektromagnetyczne, woda, kurz itp. Środowisko przemysłowe staje się więc pierwszym ważnym czynnikiem ograniczenia wyboru.

Następny czynnik to własności wyrobu: ciężar, wymiary gabarytowe, materiał. Kolejny czynnik to wymagana trajektoria, określona wszystkimi niezbędnymi ustawieniami końcówki robota na określonej pozycji z wymaganą dokładnością. Ten problem nie istniał w starszych typach linii obróbkowych, ponieważ większość przedmiotów była wyjmowana ręcznie przez operatora obrabiarki. W elastycznym systemie nie jest to dopuszczalne. Robot przemysłowy musi współpracować z obrabiarką, wysyłać do niej sygnały sterujące i je odbierać.

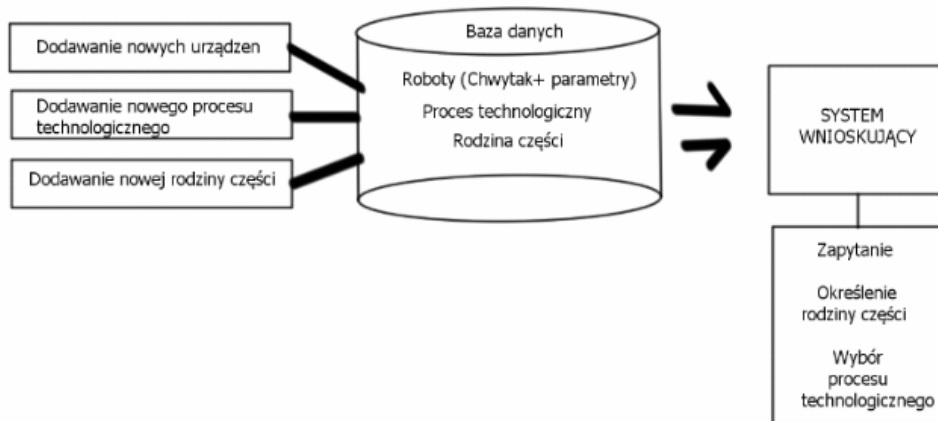
Muszą być określone wszystkie możliwe pozycje ustawienia robota i jego końcówki oraz podjęta decyzja czy konkretny robot może je osiągnąć. Każde

wymagane ustawienie może wpłynąć na dobór robota. Należy zwrócić uwagę na to, że niektóre roboty nie zawsze mogą osiągnąć wymagane ustawienie końcówki z przedmiotem, chociaż znajdują się formalnie w przestrzeni roboczej. Nie wszystkie roboty, które mają możliwość osiągnięcia jednego z wymaganych ustawień mogą osiągnąć kolejne. W różnych ustawieniach mogą być wymagane różne wartości pozycjonowania oraz różna maksymalna waga przemieszczanego przez robota przedmiotu. W wyniku analizy uwarunkowań system powinien wybrać robota, który spełnia wymagania najtrudniejszego z wymaganych ustawień i największą wymaganą dokładność pozycjonowania.

Ważnym kryterium wyboru robota i urządzenia manipulacyjnego jest uwzględnienie sposobu uchwytu wyrobu, pozwalającego bezpiecznie przeprowadzić wymagany w technologii proces przemieszczenia i manipulacji. Należy zwrócić uwagę na powierzchnię chwytu, jako parametru wiążącego chwytak z przedmiotem.

Ważnymi czynnikami wyboru są cena i koszty eksploatacji systemu. System powinien pracować co najmniej kilkanaście lat z najwyższą możliwą niezawodnością. Nie zawsze robot spełniający wszystkie wymagania procesu technologicznego i najtańszy będzie tu najlepszą inwestycją.

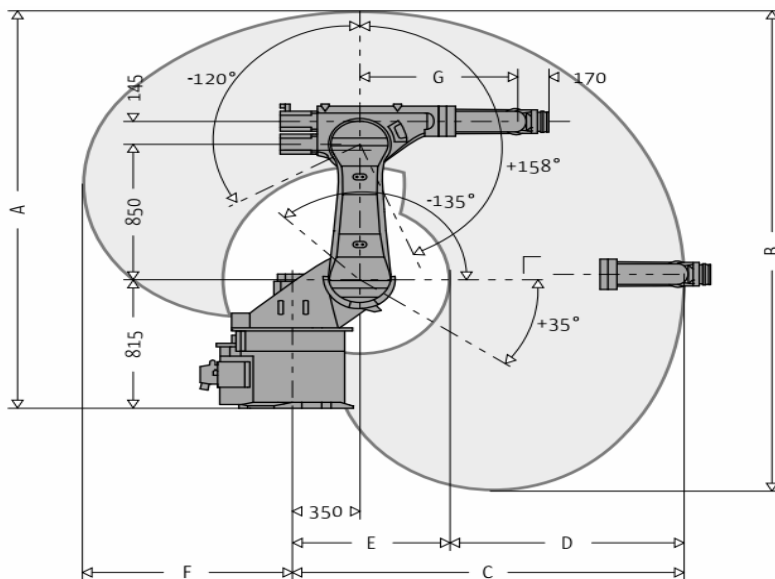
Dane i warunki wyboru stanowią podstawę budowy ekspertowego systemu projektowania podsystemu transportu i manipulacji ZESP. Uproszczoną strukturę takiego systemu przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Uproszczona struktura ekspertowego systemu projektowania podsystemu manipulacji

2.3. Uwagi do źródeł danych o robotach

Katalogi producentów robotów przemysłowych zawierają opisy, parametry i rysunki przestrzeni roboczych robotów. Przestrzenie robocze nie są jednak opisane w nich w wystarczający sposób. Brakuje niektórych wymiarów lub są one niejednoznaczne.

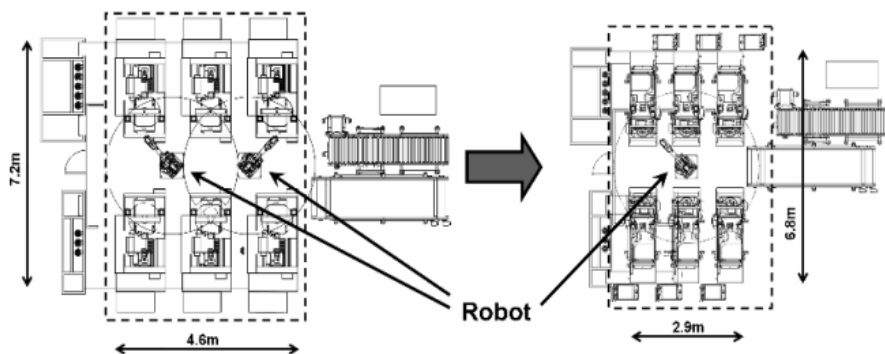


Rys. 3. Przykład wymiarowania przestrzeni roboczej [5]

Na przedstawionym wyżej rysunku 3 pochodzącym z katalogu jednej z firm produkujących roboty, nie są podane niektóre wymiary przestrzeni roboczej. Podobnie jest w katalogach innych firm. Chociaż o wartościach niepodanych wymiarów można wnioskować w sposób przybliżony, nie jest to dobre wyjście. Dla jednoznacznego zdefiniowania przestrzeni roboczej robota producenci powinni zamieszczać w katalogach podobne wyczerpujące dane.

Parametry przestrzeni roboczej wpływają na racjonalizację stosowania maszyn i robotów w procesach produkcyjnych.

Jak pokazują badania zawarte w publikacji [6], dzięki analizom prowadzącym do ograniczenia przestrzeni zajmowanej przez maszyny i roboty zaoszczędzono około 10–15% powierzchni produkcyjnej, a zamiast dwóch robotów zastosowano jeden (rys. 4).



Rys. 4. Przykład minimalizacji w procesie wytwórczym [6]

Niepełne są również inne dane podawane w katalogach. Zbierając dane z katalogów producentów robotów zmuszani jesteśmy do korzystania z różnorodnych wersji tych samych katalogów. Przykładem może być parametr podający zużycie prądu. Nie jest on podawany w polskich katalogach, jest natomiast podawany w katalogach angielskojęzycznych. Utrudnia to a czasem wręcz uniemożliwia zbudowanie pełnej bazy danych. Katalogi tych samych producentów napisane w różnych językach wykazują czasem znaczące różnice. Zdarza się, że znacznie więcej informacji można znaleźć w katalogach przeznaczonych na rynek angielski, rosyjski, francuski, niemiecki niż w katalogach przeznaczonych na rynek polski. Byłoby wskazane, żeby dane w katalogach różnych producentów odpowiadały pewnemu poziomowi standaryzacji, odnoszącemu się do rodzaju danych, ich zapisu i przedstawienia. Ułatwi to w znaczącym stopniu pracę projektantom systemów produkcyjnych oraz projektantom modeli danych i baz danych robotów i urządzeń manipulacyjnych stanowiących podstawę systemów komputerowego wspomaganie projektowania podsystemu transportu i manipulacji ZESP.

2.4. Rola systemów komputerowego wspomaganie wyboru urządzeń i systemów symulacji

Przy tworzeniu komputerowego systemu wspomaganie wyboru urządzeń dla podsystemu transportu i manipulacji stawiane jest czasami pytanie, czy jest on potrzebny przy dostępności programów przeznaczonych do symulacji zrobotyzowanych gniazd i systemów takich jak np. ABB Robot Studio [10]. Odpowiedź jest jednoznaczna. Komputerowy system wyboru urządzeń pełni w procesie projektowania inną rolę niż systemy symulacji. W przypadku systemów zrobotyzowanych, programy do symulacji służą do sprawdzenia pracy zrobotyzowanego gniazda lub systemu w wirtualnym środowisku komputera symulującym pracę rzeczywistego środowiska pracy robota. Środowisko wirtualne powinno jak się to da najlepiej odwzorowywać pracę robota w środowisku

rzeczywistym. W zasadzie model robota użytego w programie symulacyjnym powinien być modelem robota wybranego przez komputerowy system wyboru robotów, zgodnie z wymaganiami środowiska pracy robota (wyrób, technologia, scenariusze produkcji, środowisko). Programy do symulacji powinny dysponować bibliotekami modeli produkowanych robotów. Popularne programy do symulacji nie mają często takich możliwości. Dlatego służą one w dużej części do oceny zgodności przepływów wyrobów i oprzyrządowania z procesem technologicznym. Nie rozwiązują problemów uchwytu wyrobów, współpracy z innymi urządzeniami, kolizji itp. Dają jedynie pewne możliwości sprawdzenia słuszności wyboru. Podstawowy początkowy wybór robota lub urządzenia manipulacji dokonywany jest przez system komputerowego wspomaganie projektowania. Często wadą programów symulacyjnych jest ograniczenie modeli do modeli robotów i obrabiarek jednego producenta. Ograniczenie takie zawęża możliwość użycia programów symulacyjnych. Tylko nieliczne programy do symulacji oferują modele rzeczywistych obrabiarek i robotów różnych firm.

Ostateczne sprawdzenie poprawności pracy systemu odbywa się w środowisku przemysłowym. Można wtedy w pełni stwierdzić, czy system spełnia swoje zadanie, uwzględnia wszystkie parametry pracy i zapewnia wymagany poziom elastyczności.

3. Podsumowanie

Produkcja w warunkach częstych zmian rynkowych nowoczesnych, technicznie złożonych wyrobów nie jest możliwa bez zastosowania w procesach produkcyjnych nowoczesnych sterowanych cyfrowo maszyn i urządzeń. Roboty i obrabiarki sterowane numerycznie są już dzisiaj powszechnie stosowanymi środkami produkcji a jednocześnie podstawowymi środkami automatyzacji stosowanymi w zautomatyzowanych systemach wytwarzania. Wiedza na temat zautomatyzowanego wytwarzania staje się dzisiaj podstawową wiedzą z obszaru metod wytwarzania. Poznanie zautomatyzowanych systemów wytwarzania i metod ich projektowania posiada duże wartości poznawcze i praktyczne, szczególnie kiedy do ich projektowania proponuje się zastosować systemy komputerowe, które przyspieszają procesy projektowania ZESP i poprawiają ich jakość.

LITERATURA

1. Gola A.: Metodyka doboru podsystemu obrabiarek w elastycznym systemie produkcyjnym części klasy korpus. Praca doktorska. Lublin : Politechnika Lubelska, 2010.
2. Zdanowicz R.: Podstawy Robotyki. Gliwice : Politechnika Śląska, 2012.
3. Gania I.: Elastyczne systemy produkcyjne (ESP). Logistyka. str. 33-37, 2006, nr 5/2006.
4. Efektywność ekonomiczna elastycznej produkcji. Stanisław, Marciniak. Warszawa : Wyd. Politechniki Warszawskiej, 1992, Tom Zeszyt 9.
5. Zawadzka L.: Podstawy projektowania elastycznych systemów sterowania. Gdańsk : Wyd. Politechniki Gdańskiej, 2000.

6. Współczesne problemy i kierunki rozwoju elastycznych systemów. Gdańsk : Wyd. Politechniki Gdańskiej, 2007.
7. Youssef, A.M.A., ElMaraghy, H.A. Assessment of Manufacturing Systems Reconfiguration Smoothness . International Journal of Advanced Manufacturing. Vol. 30, 2006, No. 1-2: 174-193.
8. Modeling and Optimization of Multiple-Aspect RMS Configurations Using GAs. Special Issue of International Journal of Production Research on:Advances In Evolutionary Computation for Design and Manufacturin. Vol. 44, 2006, No. 22: 4929-4958.
9. ElMaraghy, H.A. Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems Paradigms. International Journal of Flexible Manufacturing Systems (IJFMS). Tom Vol. 17, No. 4: 261-276.
10. Kuka-robotics. <http://www.kuka-robotics.com/poland/pl/downloads/>. [Online] 2012. http://www.kuka-robotics.com/res/sps/a737ee03-5832-4c95-9d9184e0de80c664_KUKA_MITTLERE_TL_121029_PL.pdf.
11. Tolio, Tullio. Design of Flexible Production System. Methodologies and Tools. Milano : Springer, 2009.
12. Yoram Koren. The Global Manufacturing Revolution.Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems, John Wiley & Sons Inc. 2010

THE FOUNDATIONS OF COMPUTER-AIDED TRANSFER AND MANIPULATION SUBSYSTEMS IN AUTOMATED MANUFACTURING SYSTEMS.

Abstract

The article presents the foundations of computer-aided transfer and manipulation subsystems in automated manufacturing systems. The basic components of the manufacturing process such as product, technology, manufacturing system and their importance for the designing process are also outlined. The architecture of the aiding system based upon the manufacturing process components is characterised. The system is based on the integrated data model. The article emphasises the importance of inclusion of standardised product data in all manufacturers' catalogues.

Keywords: Robot design, FMS, ESP, manipulation, knowledge base, database

PROJEKTOWANIE ZROBOTYZOWANEGO PODSYSTEMU TRANSPORTU I MANIPULACJI DLA ZAUTOMATYZOWANYCH ELASTYCZNYCH SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH. ZARYS PROBLEMATYKI

Streszczenie

Artykuł omawia zarys budowy komputerowego systemu wspomagającego proces projektowania zrobotyzowanego podsystemu transportu i manipulacji. Omawia sposób organizacji danych i zarys systemu, który w przyszłości może posłużyć do doboru maszyn transportu i manipulacji. Prezentuje problemy, z którymi należy się zmierzyć przy projektowaniu systemu. Przedstawia uwagi o standaryzacji danych, które powinny być uwzględniane w katalogach przez producentów maszyn.

Słowa kluczowe: robot, projektowanie, FMS, ESP, manipulacja, baza wiedzy, baza danych

Dr hab. inż. Jerzy STAMIROWSKI, prof. PŚK
Mrg inż. Dawid SKRZYPCZYŃSKI (doktorant)
Katedra Automatyki i Robotyki
Centrum Laserowych Technologii Metali
Politechnika Świętokrzyska
25-314 Kielce, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7
e-mail: e.stamirowska@upcpoczta.pl
davskr@gmail.com

ANALIZA WYDAJNOŚCI PRACY RĘCZNEJ I PRACY ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO NA PRZYKŁADZIE SYMULACJI KOMPUTEROWEJ STANOWISKA PRASY HYDRAULICZNEJ

Wstęp

Produkcja przemysłowa wymaga wykonania pracy. Jeszcze do niedawna większość prac była wykonywana ręcznie przez wykwalifikowanych pracowników. Rewolucja przemysłowa spowodowała zastąpienie pracy ludzkiej pracą zmechanizowaną. Ale w dalszym ciągu potrzebny był udział człowieka do obsługi i sterowania maszyny. Obecnie można zaobserwować coraz szersze wykorzystanie automatyzacji i robotyzacji, które powodują zastępowanie pracy ludzkiej pracą zautomatyzowaną [4].

Praca ludzka jest w dalszym ciągu niezastąpiona w wielu gałęziach przemysłu. Na przykład podczas montażu złożonych wyrobów. Człowiek charakteryzuje się dużą elastycznością działania, potrafi radzić sobie nawet w przypadku znacznych zakłóceń. Z drugiej strony człowiek stanowi najbardziej zawodne ogniwo w systemie produkcyjnym. Szybko się męczy, nudzą go monotonne i powtarzalne czynności. Może popełniać błędy i niespodziewanie zachorować, co powoduje zakłócenia w procesie produkcji.

Dlatego dąży się do zastępowania pracy ludzkiej pracą zautomatyzowaną lub zrobotyzowaną, szczególnie dla czynności powtarzalnych i wymagających dużej precyzji tj. np. spawanie, lub dla czynności monottonnych i wymagających wysiłku fizycznego tj. np. manipulacja ciężkimi przedmiotami.

Możliwa jest automatyzacja takich czynności za pomocą stosunkowo prostych elementów mechanicznych, elektrycznych, pneumatycznych, hydraulicznych lub ich kombinacji. Lecz takie rozwiązanie jest sztywne (mało elastyczne) i przeznaczone do wykonywania jednego rodzaju produkcji. Zmiany profilu produkcji są utrudnione lub prawie niemożliwe bez istotnej ingerencji w strukturę takiego systemu.

Z kolei zastosowanie robotów przemysłowych jest bardziej elastyczne. Mają one możliwości ruchowe podobne do ręki człowieka i mogą wykonywać różne złożone czynności podobnie jak człowiek. Ponadto roboty się nie męczą i nie nudzą. Mogą pracować 24 godziny na dobę z taką samą precyzją i wydajnością.

Szacuje się, że dzięki zastosowaniu robotów wiele firm w kraju i za granicą odnotowało redukcję kosztów o 50%, wzrost produktywności o 30%, oraz zwiększenie wydajności pracy o ponad 85% [1].

Jednakże wprowadzenie robotyzacji wymaga poniesienia wysokich kosztów związanych nie tylko z zakupem robota, ale również z zaprojektowaniem i wykonaniem stanowiska zrobotyzowanego i przystosowaniem systemu transportowego. Robotyzacja będzie opłacalna tylko w pewnych warunkach produkcyjnych, przy wysokim poziomie produkcji, do prac powtarzalnych i wymagających precyzji. Takie warunki występują w przemyśle motoryzacyjnym i tam wykorzystywanych jest najwięcej robotów, ale coraz niższy koszt robotów powoduje, że opłacalne staje się zastosowanie robotyzacji także w innych gałęziach przemysłu.

Jednakże już na etapie wstępnego projektowania systemu produkcyjnego należy ocenić efektywność i opłacalność stosowania robotyzacji dla każdego przypadku indywidualnie. Może się okazać, że jeden robot może zastąpić pracę kilku ludzi. Z drugiej strony może się okazać, że łatwiej i taniej będzie zatrudnić trzech ludzi do pracy na trzy zmiany.

1. Projektowanie i modernizacja systemów produkcyjnych pod kątem robotyzacji

Procesy produkcyjne związane z wytwarzaniem złożonych wytworów wymagają wielu stadiów przetwarzania. Dlatego systemy produkcyjne są zwykle bardzo złożone. W ramach systemu produkcyjnego można wyróżnić podsystemy – wydziały i komórki produkcyjne oraz pojedyncze stanowiska pracy. Stanowiska pracy mogą być obsługiwane ręcznie, mogą być częściowo zautomatyzowane lub zrobotyzowane. Projektując stanowisko zrobotyzowane należy dokładnie rozważyć aspekty ekonomiczne, techniczne, organizacyjne, społeczne, transportowe oraz związane z bezpieczeństwem i higieną pracy [14].

Podczas projektowania i modernizacji lub reorganizacji systemów produkcyjnych konieczne jest określenie wydajności pracy oraz norm czasu pracy, aby można było przeprowadzić analizę ekonomiczną [14, 15].

Do analizy czasu pracy i wydajności pracy można wykorzystać metody analityczne, statystyczne lub symulacyjne [13].

Często wykorzystywane są metody statystyczne. Mogą one być uproszczone (opracowane na podstawie wcześniejszej produkcji podobnych produktów) lub szczegółowe (normatywy czynności na stanowisku opracowane na podstawie chronometrażu).

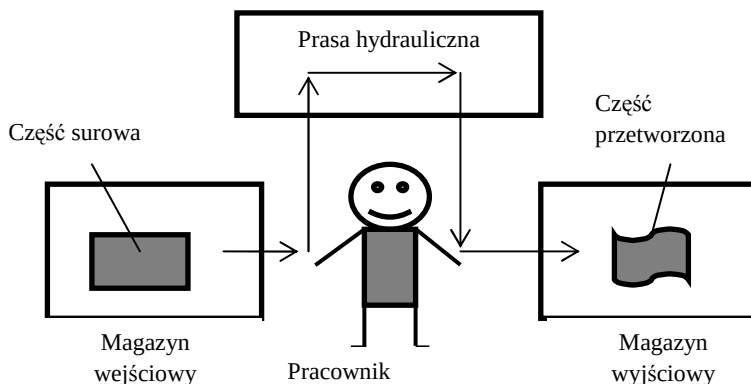
W metodach analitycznych wykorzystuje się pewien model matematyczny procesu technologicznego do obliczenia czasu pracy, ale dotyczy to przede wszystkim czasu maszynowego. Czas pracy ludzkiej podlega zbyt dużym wahaniom i trudno jest go uwzględnić.

W metodach symulacyjnych wykorzystuje się komputerowe modelowanie systemów produkcyjnych do symulacji i wizualizacji przebiegu produkcji. Aby osiągnąć poprawne rezultaty bardzo istotny jest dobór odpowiednich parametrów początkowych modelu. W praktyce czynnik ludzki jest często pomijany w symulacjach komputerowych ze względu na trudność uwzględnienia zakłóceń związanych z pracą ludzką [2].

2. Analiza pracy na stanowisku prasy hydraulicznej

Rozważmy dla przykładu stanowisko prasy hydraulicznej, na której odbywa się tłoczenie elementów z blachy. Projektując system z takim stanowiskiem należy rozważyć sposób obsługi stanowiska. Może ono działać z wykorzystaniem obsługi ręcznej, z mechanicznym podajnikiem i odbiornikiem, lub z wykorzystaniem robota przemysłowego.

Prasy hydrauliczne są szeroko stosowane, głównie do tłoczenia i wyciskania, ze względu na duże osiągi tj. siła nacisku i duży zakres skoku. Z ekonomicznego punktu widzenia stosowanie pras hydraulicznych jest uzasadnione w przypadkach, gdy występują częste zmiany programu produkcyjnego [11]. W prasach hydraulicznych można regulować długość skoku, prędkość suwaka i nacisk maksymalny (w odróżnieniu od pras mechanicznych, które są trochę szybsze, ale mają mniejszy skok roboczy), co pozwala wykonywać na nich różny asortyment produktów, ograniczony jedynie maksymalnymi wymiarami przestrzeni roboczej prasy. Sama operacja tłoczenia realizowana na stanowisku charakteryzuje się określonym stałym czasem jednostkowym wynikającym ze specyfiki procesu tłoczenia. Dla określenia wydajności pracy stanowiska decydujący będzie czas obsługi związany z dostarczeniem półproduktu i odbiorem wytłoczki. Ze względu na różnorodność produkowanego asortymentu mechaniczne urządzenia podające nie zdają w tym przypadku egzaminu i pozostaje rozważenie obsługi ręcznej lub zastosowanie robota przemysłowego.



Rys. 1. Schemat stanowiska prasy z obsługą ręczną

Na czas pracy maszyny t_m składają się trzy stałe ruchy [10]:

- Ruch szybki – dosunięcie suwaka,
- Ruch roboczy – wolny,
- Ruch powrotny – szybki,

Dla danego produktu są one stałe i zależne od głębokości tłoczenia i skoku prasy. Łączny czas może wynosić od kilku do kilkunastu sekund.

Czynności wykonywane przez pracownika:

- Pobranie półwyrobu (np. arkusza blachy) z magazynu wejściowego,
- Umieszczenie półwyrobu na stole prasy,
- Uruchomienie prasy za pomocą przycisków sterowania oburęcznego,
- Obserwacja procesu tłoczenia i oczekiwanie na zakończenie pracy maszyny,
- Pobranie gotowej wytłoczki i usunięcie odpadów,
- Umieszczenie wytłoczki w magazynie wyjściowym, itd.

Ze względu na czynniki ludzkie takie jak doświadczenie, zmęczenie, samopoczucie, wiek i inne, czas obsługi ręcznej może się znacznie wahać. Najczęściej uwzględnia się go na podstawie normatywów branżowych lub zakładowych.

Norma czasu jednostkowego, na jedną sztukę [10]:

$$t_j = t_m + t_p + t_f + t_o \quad (1)$$

gdzie: t_m – czas maszynowy

t_p – czas pomocniczy (podawanie i odbieranie, włączanie)

t_f – czas na potrzeby fizjologiczne pracownika

t_o – czas obsługi stanowiska (czyszczenie, smarowanie, zbieranie odpadów)

Czas operacyjny t_{op} (czas wykonania):

$$t_{op} = t_m + t_p \quad (2)$$

Czas dodatkowy t_d

$$t_d = t_f + t_o \quad (3)$$

Czas dodatkowy przyjmuje się na podstawie wskaźników proporcjonalnie do czasu wykonania t_{op} i wtedy czas jednostkowy wynosi:

$$t_d = t_{op} (1 + K) \quad (4)$$

$K = 6\text{--}14\%$ w zależności od wielkości prasy.

Czas przygotowawczo-zakończeniowy t_{pz} związany jest z przygotowaniem stanowiska do wykonania całej partii produktów i uporządkowaniem stanowiska po zakończeniu pracy. Obejmuje założenie i ustawienie tłoczniaka oraz sprawdzenie pierwszej sztuki. W zależności od wymiarów przedmiotu, wielkości prasy oraz stopnia skomplikowania tłoczniaka czas t_{pz} może wynosić od kilku do kilkunastu minut lub nawet kilkudziesięciu minut dla skomplikowanych elementów.

Zakładamy tłoczenie z arkuszy blach o wielkości ok. 200x300 mm na średniej wielkości prasie, w związku z tym można założyć $t_{pz} = 10$ min. Czas ten będzie podobny zarówno dla pracy ręcznej jak i zrobotyzowanej.

Interesuje nas maksymalna wydajność godzinowa oraz wydajność na jedną zmianę. Zakładamy czas maszynowy $t_m = 10$ s.

Do realnego czasu pracy pracownika należy uwzględnić 15 min przerwy wynikającej z Kodeksu Pracy oraz dodatkowe 15 min wynikające z czasu na potrzeby naturalne t_f [13]. Do obowiązków pracownika należy również przygotowanie stanowiska do rozpoczęcia pracy i uporządkowanie stanowiska po zakończeniu pracy (t_o – czas obsługi stanowiska). Zakładając $k_o = 0,035$ używamy, że t_o wyniesie ok. 7,5 min na zmianę roboczą.

Czas pomocniczy związany jest z czynnościami wykonywanymi ręcznie przez pracownika tj. podawanie części do prasy, włączenie prasy, odbiór wytłoczki. Czasy tych czynności podlegają wahaniom wynikającym z charakteru pracy ludzkiej. Wartości tych czasów można oszacować na podstawie normatywów branżowych, które podają średnie czasy typowych czynności wykonywanych ręcznie [10].

Czasy ręcznego podawania i odbioru przedmiotu będą uzależnione od wymiarów i masy przedmiotu oraz odległości pomiędzy maszyną a magazynami i ergonomii stanowiska pracy. Można je oszacować na podstawie analizy ruchów elementarnych np. metodą MTM, na podstawie chronometrażu, na podstawie badań statystycznych uwzględniających wcześniejszą produkcję podobnych produktów lub na podstawie normatywów branżowych [3, 9, 13].

3.1. Eksperyment – chronometraż czasu pracy na stanowiskach testowych

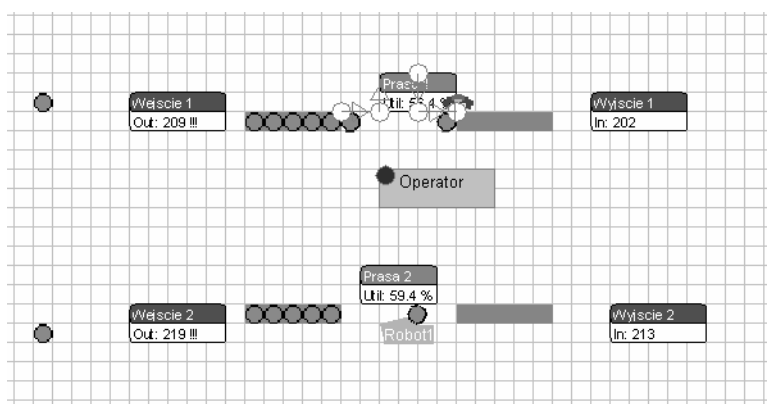
W celu określenia czasu pracy przeprowadzono chronometraż na stanowiskach testowych. Jedno stanowisko było obsługiwane ręcznie a drugie było obsługiwane przez robota. Przeprowadzono 5 prób trwających 1 godzinę z udziałem różnych osób. Uzyskano średnią wydajność godzinową $w = 201,8$ szt/godz oraz średni czas cyklu pracy $t_c = 17,94$ s, w tym czas obsługi ręcznej $t_p = 7,94$ sekundy z odchyleniem standardowym 0,78 sekundy. W przypadku obsługi ręcznej uzyskane wyniki wykazują duże wahania, wynikające m.in z dyspozycji psychofizycznej operatora, wieku, sprawności manualnej, zmęczenia i innych zmiennych czynników.

Natomiast dla stanowiska z robotem Fanuc Arcmate 100ib uzyskano stały czas cyklu pracy $t_c = 16,5$ sekundy w tym $t_p = 6,5$ sekund pracy robota, co daje wydajność godzinową $w = 218,2$ szt/godz.

3.2. Eksperyment symulacyjny

W celu analizy i zobrazowania problemu opracowano również model symulacyjny w programie Enterprise Dynamics. Program ten umożliwia symulację procesów dyskretnych i umożliwia wykorzystanie zarówno modelu pracownika jak również robota [6].

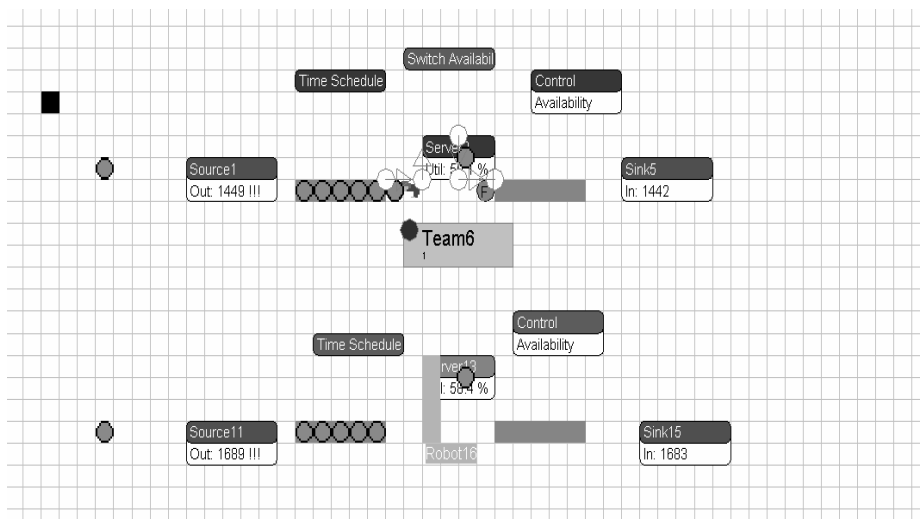
Model stanowi pewne przybliżenie analizowanego stanowiska dla ww. danych. Wykorzystano uproszczony model robota uwzględniający tylko ruch w płaszczyźnie poziomej z prędkością maksymalną 180 %/s oraz czas pobierania 1,5 s i czas odkładania 1 s.



Rys. 2. Model po 1 godzinie symulacji

W modelu symulacyjnym uzyskano zbliżone wyniki jak podczas eksperymentu. Po jednej godzinie symulacji możemy zaobserwować stosunkowo niewielki wzrost produkcji na stanowisku z robotem o 11 sztuk, co oznacza wzrost wydajności pracy robota o ok. 5% w porównaniu do pracy ręcznej.

Dla 8 godzinnego dnia pracy wystąpią większe zakłócenia w pracy ręcznej związane ze zmęczeniem pracownika. Pracownikowi przysługują również przerwy w pracy, których robot nie potrzebuje, bo się nie męczy. Dlatego opracowano również model dla symulacji 8 godzinnego dnia pracy uwzględniający przerwy w czasie pracy pracownika związane z przerwą śniadaniową 15min, czas na potrzeby naturalne 15 min i czas obsługi maszyny 7,5 min. W obu przypadkach uwzględniono czas t_{pz} związany z przygotowaniem stanowiska do pracy wynoszący $t_{pz} = 10$ min.



Rys. 3. Model po 8 godzinach symulacji

Dla symulacji 8 godzinnego dnia pracy można zaobserwować wzrost produkcji zrobotyzowanej o 241 sztuk, co odpowiada wydajności robota o 16,7% wyższej niż w przypadku pracy ręcznej.

Jeszcze większy wzrost wystąpi podczas pracy ciągłej na trzy zmiany przez cały rok, gdy występują również urlopy i zwolnienia chorobowe pracowników. Uwzględniając 20 dni urlopu w roku i średnio 10 dni chorobowego oraz 250 dni roboczych w roku wydajność pracy ręcznej może spaść o ok. 12% rocznie.

Tak, więc podstawowym czynnikiem wpływającym na efektywność robota jest zapewnienie ciągłości produkcji w dłuższym okresie czasu.

4. Aspekty ekonomiczne robotyzacji

Roboty przemysłowe są w dalszym ciągu bardzo drogie (ok. 100 000 -300 000 zł), ale ich ceny systematycznie spadają. Z kolei koszty pracy ludzkiej systematycznie rosną [8, 14]. Koszt wdrożenia stanowiska zrobotyzowanego związany z projektem, wykonaniem, szkoleniami, serwisem szacuje się na ok. 100 % kosztów zakupu robota. Czyli dla robota o średniej cenie ok. 200 tys. zł, koszt całego stanowiska może wynieść 400 tys. zł

Z kolei płace pracowników niskowykwalifikowanych są stosunkowo niskie, ale będą rosły ze względu na wzrost płacy minimalnej. (1600 zł brutto – koszt pracodawcy 1931,84 zł/miesięcznie). Należy wziąć też pod uwagę średnie wynagrodzenie w przemyśle wynoszące obecnie 3690 zł brutto, co daje koszt pracodawcy 53406 zł rocznie na 1 pracownika.

Okres zwrotu inwestycji można obliczyć z zależności [14,15]:

$$O_z = \frac{I_n}{l_z l_p k_p - (r + p)I_n} \quad (5)$$

gdzie: I_n – wartość nakładów inwestycyjnych,
 l_z – liczba zmian roboczych,
 l_p – liczba pracowników na jednej zmianie zastępowanych przez robota,
 k_p – roczny koszt utrzymania pracownika,
 r – stopa dyskontowa,
 p – udział rocznego kosztu eksploatacji robota jako procent od kapitału.

Uwzględniając, że nakłady inwestycyjne wynoszą $I_n = 400000$ zł, liczba zastępowanych pracowników $l_p = 1$, roczny koszt pracownika $k_p = 53406$ zł, liczba zmian roboczych $l_z = 1-3$, stopa dyskontowa $r = 10\%$, stopa amortyzacyjna $p = 18\%$. Obliczony okres zwrotu wynosi odpowiednio dla pracy na jedną zmianę $O_{z1} = 8,65$ lat, przy pracy na dwie zmiany $O_{z2} = 4$ lata a przy pracy na trzy zmiany $O_{z3} = 2,6$ lata. Biorąc pod uwagę, że uzasadniony ekonomicznie jest okres zwrotu rzędu 2-5 lat można zauważyć, że w tym przypadku zalecana jest praca na dwie lub trzy zmiany.

5. Podsumowanie

W krajowym przemyśle w dalszym ciągu występuje bardzo duży udział pracy ręcznej. Poziom robotyzacji jest niewielki, bo roboty stosowane są głównie w dużych i najbardziej technologicznie rozwiniętych przedsiębiorstwach z branży motoryzacyjnej [4, 14]. Raport Międzynarodowej Federacji Robotyki (IFR – International Federation of Robotics) z 2012 roku podaje m. in. wskaźnik gęstości robotyzacji dla różnych krajów świata [16]. Gęstość robotyzacji wyrażona jest jako liczba robotów przypadająca na 10 000 pracowników. Średnia światowa wynosi obecnie 55 robotów na 10 000 pracowników. Polska ze wskaźnikiem 15 znalazła się na dalekim 33 miejscu podczas gdy liderzy rankingu Korea i Japonia mają wskaźniki ok. 350. Wskazuje to na duże opóźnienie technologiczne krajowego przemysłu, który wyczerpuje już możliwość konkurowania taną siłą roboczą. Z drugiej strony malejące ceny robotów oraz wzrastające koszty pracy stwarzają szansę na szybszy rozwój robotyzacji. Efektem robotyzacji może być zmniejszenie liczby stanowisk pracy dla pracowników niskowykwalifikowanych. Ale zastosowanie robotyzacji

powoduje znaczny wzrost produkcji i również przyczynia się powstania nowych miejsc pracy [16].

Jednakże każdy przypadek zastosowania robota należy rozpatrywać indywidualnie z uwzględnieniem problematyki techniczno-organizacyjnej i szczegółowej analizy ekonomicznej.

LITERATURA

1. ABB Polska. Oszczędność i wydajność w zasięgu ręki. <http://www.abb.pl/cawp/plabb045/e1c050b343ccbf52c125794200529822.aspx>. 28.01.2013
2. Baines T., Mason S., Siebers P. O., Ladbroke J.: Humans: the missing link in manufacturing simulation? *Simulation Modelling Practice and Theory* 12 (2004) pp. 515–526.
3. Genaidy A.M., Duggal J.S., Mital A.: A comparison of robot and human performances for simple assembly tasks, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Volume 5, Issue 1, January 1990, pp. 73-81.
4. Honczarenko J.: Robotyzacja i automatyzacja lekiem na globalizację produkcji? *Przegląd Mechaniczny* nr 11/2006, str. 34-36.
5. Kampa A., Gołda G.: Modelowanie i symulacja przepływu produkcji w zrobotyzowanym gnieździe wytwórczym. *Zarządzanie przedsiębiorstwem* Nr 1/2009, str. 21-29.
6. Kampa A. Symulacja i wizualizacja systemów wytwórczych. *Inżynieria Maszyn* nr 3/ 2009, str. 81-100.
7. Kampa A.: Planning and scheduling of work in robotic manufacturing systems with flexible production. Ed. B. Skołod: *Hueristic Methods of Project and Production Scheduling*. *Journal of Machine Engineering*, Vol. 12, No. 3/2012 pp. 34-44.
8. Karabegovic E., Karabegovic I., Hadzalic E.: Industrial Robot Application Trend in World's Metal Industry. *Inżynieria Ekonomia-Engineering Economics*, 2012, 23(4), pp. 368-378.
9. Paul R. P., Nof S. Y.: Work methods measurement—a comparison between robot and human task performance. *International Journal of Production Research* Vol. 17, Iss. 3, 1979, p. 277-303.
10. Romanowski W.P.: *Poradnik obróbki plastycznej na zimno*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1976.
11. Sińczak J. (red.): *Procesy przeróbki plastycznej*. Wydawnictwo Naukowe AKAPIT, Kraków, 2001
12. *Springer Handbook of robotics*. Editors. B. Siciliano, O. Khatib. Springer, Berlin 2008.
13. Strzelecki T.J., Wołk R.: *Badanie metod i normowanie pracy*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.
14. Zdanowicz R.: *Robotyzacja dyskretnych procesów produkcyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010.
15. Żurek J. (red.): *Robotyzacja procesów technologicznych: wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1997.
16. *World robotics 2012*. IFR Statistical Department. <http://www.worldrobotics.org/>

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF MANUAL LABOR AND INDUSTRIAL ROBOT WORK ON THE EXAMPLE OF A COMPUTER SIMULATION OF A HYDRAULIC PRESS WORKSTATION

Abstract

In this article problems related with robotization of hydraulic presses are discussed. An analysis of productivity for the manually operated press and supported by the industrial robot were performed. A computer models build with use of the Enterprise Dynamics which shows manual production process and the robotized process were presented. The results of computer simulations show a significant increase in productivity for robotized production. Also issues related to the economic analysis of robotization in this case were discussed.

Keywords: human factor, industrial robot, hydraulic press, time measure methods

ANALIZA WYDAJNOŚCI PRACY RĘCZNEJ I PRACY ROBOTA PRZEMYSŁOWEGO NA PRZYKŁADZIE SYMULACJI KOMPUTEROWEJ STANOWISKA PRASY HYDRAULICZNEJ

Streszczenie

W artykule omawiania jest problematyka związana z robotyzacją procesów obsługi pras hydraulicznych. Przedstawiono analizę wydajności pracy dla stanowiska obsługiwanego ręcznie oraz obsługiwanego przez robota przemysłowego. Przedstawiono komputerowy model procesu produkcji ręcznej i zrobotyzowanej z wykorzystaniem Enterprise Dynamics. Wyniki symulacji komputerowej wskazują na znaczący wzrost wydajności dla produkcji zrobotyzowanej. Omówiono również zagadnienia związane z analizą ekonomiczną robotyzacji.

Słowa kluczowe: czynnik ludzki, robot przemysłowy, prasa hydrauliczna, metody określania czasu pracy

Dr inż. Adrian KAMPA
Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
Politechnika Śląska
44-100 Gliwice, ul. Konarskiego 18A
Tel. 32-237-18-63 Fax: 32-237-16-24
e-mail: adrian.kampa@polsl.pl

WPLYW RODZAJU ZLECENIA PRODUKCYJNEGO NA SPOSÓB ORGANIZACJI OPROGRAMOWANIA WYCINARKI LASEROWEJ

Wstęp

Podstawowym celem technologa programującego wycinarkę laserową pod konkretne zlecenie produkcyjne jest minimalizacja kosztów produkcji. Cel ten można uzyskać różnymi sposobami, tj. minimalizując zużycie materiału, czas programowania urządzenia, czas wypalania przedmiotów bądź też dobierając optymalne parametry cięcia blachy stalowej. Ważnym etapem procesu tworzenia oprogramowania wycinarki jest prawidłowe rozłożenie przedmiotów na arkuszach blachy. Technolog może zrobić to w sposób automatyczny bądź ręczny. Przy automatycznym rozmieszczaniu wykorzystuje się procesor upakowujący, który może obliczyć obłożenie arkusza jednakowymi lub odmiennymi przedmiotami według różnych strategii.

Automatyczny sposób rozłożenia przedmiotów na arkuszu na ogół daje korzyść w postaci skrócenia czasu programowania wycinarki. Jednak sposób taki posiada też pewne wady. Są nimi większe zużycie materiału, szczególnie przy większych zleceniach produkcyjnych oraz niektóre przypadki mogące mieć wpływ na ostateczną jakość wycinanych przedmiotów, np. przypadkowe ułożenie dużej ilości małych detali w bliskim sąsiedztwie, co przy szybkim cięciu może grozić przegrzaniem materiału.

1. Opis i organizacja stanowisk pracy technologów

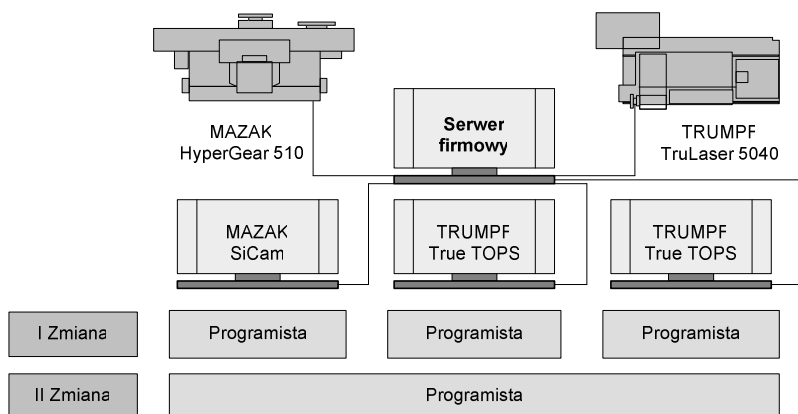
Przedmiotem oceny organizacji pracy technologów jest firma prowadząca działalność produkcyjną w regionie lubelskim. Firma specjalizuje się w obróbce metali, a szczególnie w cięciu i gięciu blach stalowych. Firma posiada zarówno tradycyjny park maszynowy jak i nowoczesne urządzenia CNC do obróbki metali.

Firma oferuje i realizuje procesy z zakresu cięcia laserowego blach, rur i profili zamkniętych, gięcia blach na prasach krawędziowych CNC, gięcia rur na giętarkach CNC, cięcia na pilach taśmowych i na gilotynach, zarówno na własne potrzeby jak i dla kooperantów.

W zakresie cięcia laserowego firma posiada dwie nowoczesne wycinarki laserowe, tj:

- TRUMPF TruLaser 5040 z rezonatorem o mocy 5000 W.
- MAZAK HyperGear 510 z rezonatorem o mocy 4000 W.

W firmie zatrudnionych jest czterech programistów-technologów. Praca odbywa się w systemie dwuzmianowym. Na I zmianie programują dwaj technologzy. Jeden obsługuje wycinarkę TRUMPF, a drugi wycinarkę MAZAK. Trzeci programista pracuje na II zmianie. Do jego obowiązków należy nadzorowanie przebiegu procesu cięcia blach i ewentualne wprowadzanie korekt w przygotowanych wcześniej programach. Czwarty programista-technolog zajmuje się wyceną zleceń zewnętrznych. Do jego zadań należy również tworzenie wstępnych programów, które są wykorzystywane do szacowania kosztów wykonania zewnętrznych zleceń produkcyjnych. Komputery podłączone są do sieci zakładowej, wszystkie dane są pobierane i zapisywane na serwerze firmowym z uwagi na możliwość pracy grupowej (rys. 1).



Rys. 1. Schemat organizacji stanowisk pracy technologów do programowania wycinarek

Źródło: Opracowanie własne.

2. Dane do projektowania procesu technologicznego

W zależności od tego, jaką dokumentacją techniczną dysponuje programista sposób tworzenia geometrii detalu może mieć różny przebieg (rys. 2).

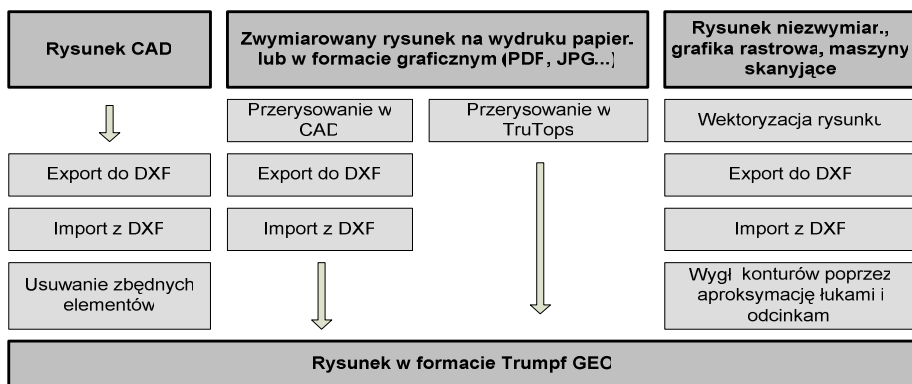
1. Rysunki wykonane w CAD.
2. Wydruk rysunku z pliku PDF.
3. Kształty zeskanowane przy pomocy maszyny pomiarowej.
4. Pliki rastrowe.
5. Fonty.

Ad. 1. Najczęstszym rodzajem dokumentacji otrzymywanej przez technologów są rysunki w formie elektronicznej typu CAD. Rysunki zawierające rozwinięcia

detali w formatach DXF mogą być bezpośrednio wczytywane przez program GEO TRUMPF i zamieniane na pliki GEO, wykorzystywane przez program TruTops.

Ad. 2. W przypadku dokumentacji papierowej otrzymanej z pliku PDF niezbędne jest przerysowanie elementów w module TruTops CAD. Praca odbywa się bezpośrednio w formacie GEO TRUMPF. Za pomocą licznych intuicyjnych ikon, a także linii pomocniczych oraz gotowych makr można szybko i łatwo narysować detale w płaszczyźnie 2D.

Jeśli rysunki są bardziej skomplikowane istnieje możliwość narysowania ich w innych programach typu CAD takich jak: AutoCAD, Solid Edge, Solid Works czy Inventor. Pliki w ten sposób stworzone należy zapisać w formacie DXF.



Rys. 2. Schemat przedstawiający tworzenie rysunków w formacie Trumpf GEO

Źródło: Opracowanie własne.

Ad. 3. Maszyny pomiarowe umożliwiają wykonywanie pomiarów przestrzennych skomplikowanych przedmiotów. Jedną z zalet tej techniki jest wykonywanie pomiarów różnych przedmiotów o skomplikowanych kształtach, których nie można zmierzyć za pomocą zwykłych przyrządów warsztatowych. Zeskanowane części mogą służyć jako dokumentacja do wykonania wykroi laserowych.

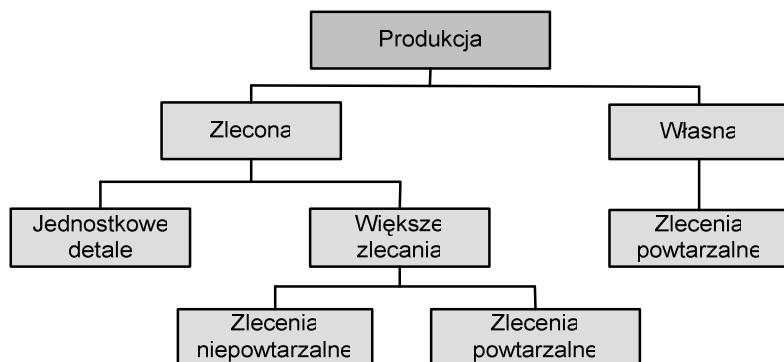
Ad. 4. Źródłem informacji o geometrii przedmiotów mogą być także pliki rastrowe, czyli różnego rodzaju reklamy, zdjęcia, skany. Obróbka ich polega na wektoryzacji kształtów przy pomocy programów do grafiki wektorowej albo obrysowywaniu konturów w programach CAD.

Ad. 5. Fonty używane są do oznaczania tekstem przedmiotów, a także do wycinania szablonów, napisów. TruTops posiada własne, wewnętrzne formaty czcionek, ale może także korzystać z zasobów Windowsa. Posiada on opcję wektoryzacji czcionek TTF.

3. Opis badań

Do przeprowadzenia badań wybrano zlecenie produkcyjne składające się z sześciu przedmiotów o różnych kształtach, których dane geometryczne mogą być dostarczone do przedsiębiorstwa w postaci papierowej lub elektronicznej – sporządzonej w oprogramowaniu CAD-owskim. W przypadku dokumentacji papierowej technolog ma możliwość przerysowania rysunku bezpośrednio w module TruTops CAD lub sporządzenia go w jednym z programów typu CAD i zapisania w formacie DXF. Czasy tworzenia rysunków zamieszczone są w tabeli 1. Tabela 2 przedstawia łączny czas tworzenia geometrii przedmiotu w zależności od zakresu opracowania technologii cięcia, tj. technologia wstępna, pełna lub bez technologii. Tabela 3 zawiera dodatkowe informacje dotyczące zlecenia produkcyjnego i pracy wycinarki laserowej. Zlecenie produkcyjne dotyczy opracowania technologii cięcia i wykonania 4 przedmiotów GK001, 4-GK001A, 12-GK005B, 12-GK006A, 12-GK007A i 12-GK008A na wycinarce TRUMPF.

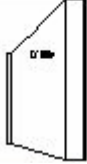
W badaniach porównano czasy i koszty realizacji tego samego zlecenia produkcyjnego w różnych wariantach, tj. dla jednokrotnego, dwukrotnego i wielokrotnego zlecenia, różnicując ten ostatni przypadek na zewnętrzne zlecenie produkcyjne i wielokrotnie powtarzającą się produkcję tych samych przedmiotów na potrzeby własne przedsiębiorstwa. Poszczególne przypadki produkcji przedstawione są na rys. 3.



Rys. 3. Wybór ekonomicznego sposobu opracowania technologii cięcia
Źródło: Opracowanie własne.

Łączny czas wykonania zlecenia produkcyjnego w zależności od rodzaju zlecenia produkcyjnego i sposobu jego realizacji zestawiono w tabeli 4.

Tabela 1. Czasy poszczególnych operacji przy tworzeniu plików GEO

	OPERACJA	CZAS [h]
 GK001	Rysowanie TOPS	0.2
	Rysowanie CAD	0.18
	Import CAD	0.05
	Wpisanie atrybutów	0.01
	Wstępna technologia	0.2
	Pełna technologia detalu	0.3
 GK001A	Rysowanie TOPS	0.1
	Rysowanie CAD	0.1
	Import CAD	0.04
	Wpisanie atrybutów	0.01
	Wstępna technologia	0.18
	Pełna technologia detalu	0.25
 GK005B	Rysowanie TOPS	0.1
	Rysowanie CAD	0.1
	Import CAD	0.04
	Wpisanie atrybutów	0.01
	Wstępna technologia	0.2
	Pełna technologia detalu	0.3
 GK006A	Rysowanie TOPS	0.1
	Rysowanie CAD	0.1
	Import CAD	0.04
	Wpisanie atrybutów	0.01
	Wstępna technologia	0.12
	Pełna technologia detalu	0.2
 GK007A	Rysowanie TOPS	0.1
	Rysowanie CAD	0.1
	Import CAD	0.04
	Wpisanie atrybutów	0.01
	Wstępna technologia	0.12
	Pełna technologia detalu	0.2
 GK008A	Rysowanie TOPS	0.1
	Rysowanie CAD	0.1
	Import CAD	0.04
	Wpisanie atrybutów	0.01
	Wstępna technologia	0.12
	Pełna technologia detalu	0.2

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych uzyskanych z firmy.

Tabela 2. Czas tworzenia geometrii dla poszczególnych przedmiotów

Detal	Czas sporządzania rysunku w [h]		Wpis. Atrybu- tów	Technologia i czas opracow. technol. w [h]		Czas razem w [h]
GK001	Rysowanie detali w programie TruTops	0,2	0,01	wstępna	0,2	0,41
				pełna	0,3	0,51
				bez technologii	0	0,21
	Rysowanie detali w innym programie typu CAD	0,18		wstępna	0,2	0,39
				pełna	0,3	0,49
				bez technologii	0	0,19
	IMPORT plików DXF	0,05		wstępna	0,2	0,26
				pełna	0,3	0,36
bez technologii			0	0,06		
GK00 A	Rysowanie detali w programie TruTops	0,1	0,01	wstępna	0,18	0,29
				pełna	0,25	0,36
				bez technologii	0	0,11
	Rysowanie detali w innym programie typu CAD	0,1		wstępna	0,18	0,29
				pełna	0,25	0,36
				bez technologii	0	0,11
	IMPORT plików DXF	0,04		wstępna	0,18	0,23
				pełna	0,25	0,30
bez technologii			0	0,05		
GK005B	Rysowanie detali w programie TruTops	0,1	0,01	wstępna	0,2	0,31
				pełna	0,3	0,41
				bez technologii	0	0,11
	Rysowanie detali w innym programie typu CAD	0,1		wstępna	0,2	0,31
				pełna	0,3	0,41
				bez technologii	0	0,11
	IMPORT plików DXF	0,04		wstępna	0,2	0,25
				pełna	0,3	0,35
bez technologii			0	0,05		
GK006A	Rysowanie detali w programie TruTops	0,1	0,01	wstępna	0,12	0,23
				pełna	0,2	0,31
				bez technologii	0	0,11
	Rysowanie detali w innym programie typu CAD	0,1		wstępna	0,12	0,23
				pełna	0,2	0,31
				bez technologii	0	0,11
	IMPORT plików DXF	0,04		wstępna	0,12	0,17
				pełna	0,2	0,31
bez technologii						
GK007A	Rysowanie detali w programie TruTops	0,1	0,01	wstępna	0,12	0,23
				pełna	0,2	0,31
				bez technologii	0	0,11
	Rysowanie detali w innym programie typu CAD	0,1		wstępna	0,12	0,23
				pełna	0,2	0,31
				bez technologii	0	0,11

	IMPORT plików DXF	0,04		wstępna	0,12	0,17
				pełna	0,2	0,25
				bez technologii	0	0,05
GK008A	Rysowanie detali w programie TruTops	0,1	0,01	wstępna	0,12	0,23
				pełna	0,2	0,31
				bez technologii	0	0,11
	Rysowanie detali w innym programie typu CAD	0,1		wstępna	0,12	0,23
				pełna	0,2	0,31
				bez technologii	0	0,11
	IMPORT plików DXF	0,05		wstępna	0,12	0,18
				pełna	0,2	0,26
				bez technologii	0	0,06

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych uzyskanych z firmy.

Tabela 3. Pozostałe parametry przygotowania produkcji zlecenia

Sposób układania przedmiotów	Ręczne	Automatyczne
Czas rozkładania ręcznego przedmiotów [h]	0,8	0,5
Ilość arkuszy blachy – (1,5x1500x3000) [mm]	7	8
Czas wypalania przedmiotów [h]	0,8	1,2
Godzinowy koszt pracy wycinarki laserowej [zł.]	600	

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych uzyskanych z firmy.

Tabela 4. Całkowity czas wykonania zlecenia produkcyjnego, poszczególne czasy w [h]

rysunek	technologia	czas wykonania wszystkich przedmiotów	wczytanie do zlecenia	wybór materiału	sposób układania przed.	czas układania przedm.	dobór parametr. cięcia	gener. kodu NC i uruchom. progr.	czas ogółem
TOPS	wstępna	1,7	0,08	0,01	automat.	0,05	0,18	0,5	2,52
	pełna	2,21			ręczne	0,8	0,14	0,2	2,93
					automat.	0,05	0,08	0,5	2,93
	bez technol.	0,76			ręczne	0,8	0,02	0,2	3,32
					automat.	0,05	0,78	0,5	2,18
					ręczne	0,8	0,53	0,2	2,38
CAD	wstępna	1,68			automat.	0,05	0,48	0,5	2,8
	pełna	2,19			ręczne	0,8	0,43	0,2	3,2
					automat.	0,05	0,37	0,5	3,2
	bez technol.	0,74			ręczne	0,8	0,37	0,2	3,65
					automat.	0,05	1,08	0,5	2,46
					ręczne	0,8	0,83	0,2	2,66
IMPO RT	wstępna	1,26			automat.	0,05	0,18	0,5	2,08
	pełna	1,77			ręczne	0,8	0,13	0,2	2,48
					automat.	0,05	0,09	0,5	2,50
	bez technol.	0,32			ręczne	0,8	0,07	0,2	2,93
					automat.	0,05	0,78	0,5	1,74
					ręczne	0,8	0,53	0,2	1,94

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych uzyskanych z firmy.

4. Analiza czasowo-kosztowa przygotowania produkcji

4.1. Pojedyncze części – produkcja zlecona

Jeśli produkcja zlecona obejmuje ww. pojedyncze przedmioty to priorytetem jest jak najszybsze wykonanie usługi. W przypadku takiej produkcji zużycie materiału jest niewielkie, a w wielu przypadkach przedmioty takie są wykonywane z materiałów odpadowych. Głównym kryterium doboru sposobu postępowania jest czas.

Powyższe obliczenia dowodzą, że najszybszym sposobem wykonania zlecenia jest tworzenie wykrojów przedmiotów poprzez import plików DXF, które można automatycznie rozmieścić na arkuszu, a następnie opracować technologię cięcia. Z tabeli 4. wynika, że najkrótszy czas programowania wycinarki laserowej wynosi 1,74 h.

4.2. Większe zlecenia niepowtarzalne – produkcja zlecona

W przypadku większych zleceń mających charakter niepowtarzalny, programista powinien rozważyć dwie możliwości.

1. Przygotowanie programu w sposób automatyczny, jako najszybszy.
 $1,74 \text{ h.} \times 150 \text{ zł (koszt 1 godz. pracy programisty)} = 261,00 \text{ zł.}$
Zużycie materiału – 8 arkuszy $\times 162,00 \text{ zł (koszt zakupu arkusza blachy (1,5} \times 1500 \times 3000) \text{ mm. w gat. DC01)} = 1296,00 \text{ zł,}$
Koszt wypalania – $1,2 \text{ h} \times 600,00 \text{ zł (koszt 1 godz. pracy wycinarki)} = 720,00 \text{ zł,}$
Suma kosztów = $261,00 + 1296,00 + 720,00 = 2277,00 \text{ zł.}$
2. Przygotowanie programu w sposób ręczny
 $1,94 \text{ h.} \times 150,00 \text{ zł/h} = 291,00 \text{ zł}$
Zużycie materiału – 7 arkuszy $\times 162,00 \text{ zł} = 1134,00 \text{ zł,}$
Koszt wypalania – $0,8 \text{ h} \times 600,00 \text{ zł} = 480,00 \text{ zł,}$
Suma kosztów = $291,00 + 480 + 1134,00 = 1905,00 \text{ zł.}$
Technolog musi zdecydować co w danej chwili jest korzystniejsze dla firmy, czy oszczędność czasu, czy oszczędność materiału. Jeśli ważniejszy jest czas powinien wybrać automatyczny sposób projektowania, zyskuje w ten sposób $(1,94 - 1,74) \text{ h} = 0,21 \text{ h.}$ Jeśli ważniejsza jest minimalizacja kosztów produkcji, powinien wybrać programowanie ręczne. Oszczędności przy ręcznym rozłożeniu części na arkuszu blachy wynoszą – $(2277,00 - 1905,00) \text{ zł} = 372,00 \text{ zł.}$

4.3. Większe zlecenia powtarzalne – produkcja zlecona

W przypadku większych, powtarzalnych zleceń zewnętrznych należy kierować się przede wszystkim oszczędnością materiału. Najlepszym rozwiązaniem jest ręczne rozłożenie części ze wstępnym opracowaniem technologii cięcia.

Można szybko określić miejsce przepaleń, kolejność cięcia, czy rodzaj konturu, aby przygotowując programy przy następnym zamówieniu nie powtarzać tych samych czynności.

1. Przygotowanie programu po raz pierwszy – 2,48 h.
2. Czas przygotowania programu po raz kolejny – (2,48 - 1,26) h (czas przygotowania geometrii z technologią wstępną) = 1,22 h.
Oszczędność czasu przy kolejnym przygotowywaniu zlecenia – (2,48 - 1,22) h = 1,26 h.

4.4. Zlecenia powtarzalna – produkcja na własne potrzeby

W przypadku produkcji własnej w większości przypadków możemy już na etapie tworzenia geometrii przypisać detalom pełną technologię. Należy jednak pamiętać, że każda zmiana dotycząca detali z zapisaną technologią wymusza ponowne utworzenie pliku GMT. Mimo wszystko oszczędności przy produkcji powtarzalnej będą widoczne.

1. Przygotowanie programu po raz pierwszy – 2,93 h.
2. Czas przygotowania programu po raz kolejny – (2,93 - 1,77) h (czas przygotowania geometrii z technologią pełną) = 1,16 h.
Oszczędność czasu przy kolejnym przygotowywaniu zlecenia – (2,93 - 1,16) h = 1,77 h.

5. Wnioski

Wnioski z przeprowadzonych badań w sposób syntetyczny przedstawiono za pomocą rys. 4.

Produkcja			
Zlecona			Własna
Pojedyncze detale	Większe zlecenia		Zlecenia powtarzalne
Najkrótszy czas na przygotowanie produkcji. Celem jest jak najszybsze wycięcie elementów	Zlecenia niepowtarzalne Rozkroje generowane automat. Koszt pracy technol. jest większy od uzyskanych oszczędności materiałowych	Zlecenia powtarzalne Ręczne przygotowanie rozkrojów. Można uzyskać oszczędności przy wielokrotnym cięciu tymi samymi programom	Czas przygot. produk. najdłuższy. Koszt pracy technol. zwraca się przy wielokrotnym cięciu dużych partii produkcyjnych

Rys.4. Wybór ekonomicznego sposobu opracowania technologii cięcia
Źródło: Opracowanie własne.

THE ROLE OF A PRODUCTION ORDER IN THE PROGRAMMING OF LASER CUTTER SOFTWARE

Abstract

Laser cutter programmers routinely deal with different offers of external production orders in their professional practice. The specificity of production orders requires a fastest realization and starting a production process as cheaply as possible. Production orders may involve single items, the realization of recurring or larger, non-recurring orders. The same is true of personal use production. Each of those cases requires unique approach toward the arrangement of a production process. The production costs as well as the time to program and run a laser cutter depend on multiple factors such as the amount of the materials we use, the working time of a laser cutter or time needed to develop the machine software. The optimum solution for elaborating the cutting technology consists in choosing such a combination of the above factors as to obtain the best economic effects for the company.

Keywords: production order, production costs, software, laser cutter

WPŁYW RODZAJU ZLECENIA PRODUKCYJNEGO NA SPOSÓB ORGANIZACJI OPROGRAMOWANIA WYCINARKI LASEROWEJ

Streszczenie

Technolodzy programujący wycinarki laserowe w sferze zawodowej codziennie stykają się z różnymi ofertami zewnętrznych zleceń produkcyjnych. Specyfika zleceń produkcyjnych polega przede wszystkim na jak najszybszej ich realizacji i wytworzeniu produkcji, po możliwie najniższych kosztach. Zlecenia produkcyjne mogą dotyczyć wykonania pojedynczych przedmiotów, realizacji jednorazowych większych zleceń produkcyjnych lub zleceń wielokrotnie powtarzających się. Podobne przypadki dotyczyć mogą także produkcji na własne potrzeby. Każdy z tych przypadków wymaga indywidualnego podejścia do przygotowania procesu produkcyjnego. Koszty produkcji i czas związany z oprogramowaniem i pracą wycinarki laserowej zależą od wielu czynników, tj. wielkości zużycia materiału, czasu pracy wycinarki laserowej lub czasu wykonania oprogramowania urządzenia. Optymalny wybór sposobu opracowania technologii cięcia polega na wyborze takiej kombinacji tych czynników, aby efekty ekonomiczne z wykonania zlecenia produkcyjnego były dla przedsiębiorstwa jak najkorzystniejsze.

Słowa kluczowe: zlecenie produkcyjne, koszty produkcji, oprogramowanie, wycinarka laserowa.

Dr inż. Kazimierz SZATKOWSKI
Katedra Organizacji Przedsiębiorstwa
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38D

ANALITYCZNY OPIS PRZEPŁYWU DYSPERSJI CEMENTOWEJ W PRZEWODACH KOŁOWYCH

Wstęp

Praktyczne stosowanie metod iniekcyjnych należy do trudniejszych zadań inżynierskich, między innymi ze względu na zasadniczy brak możliwości naprawienia źle przeprowadzonej próby. Dlatego prace te wymagają już na etapie ich projektowania dobrego rozeznania możliwych do osiągnięcia efektów. W tym celu od dawna podejmowane są próby ujęcia zagadnienia przepływu cieczy iniekcyjnej, zarówno analityczne, np. [1], [2], [3], [4] jak i z wykorzystaniem metod numerycznych, opisywane w wielu publikacjach [5], [6]. Aktualnie zarówno jedne jak i drugie dalekie są jeszcze od doskonałości, jakkolwiek widoczny jest stały postęp w tej dziedzinie.

W dalszej części artykułu przedstawiono rozwiązania równań przepływu wyprowadzone dla różnych modeli reologicznych cieczy iniekcyjnej, także z uwzględnieniem dyspersyjnego charakteru iniektu cementowego, co osiągnięto przez wprowadzenie dodatkowych oporów tarciovych powstających na styku ziaren cementu. Znane w literaturze rozwiązania analityczne w zdecydowanej większości pomijają ten czynnik, co prowadzi do powstawania znacznych rozbieżności wyników obliczeń z rzeczywistymi efektami procesu iniekcji. Wnioski przedstawione w zakończeniu będą pomocne w lepszym zrozumieniu podstawowych zasad racjonalnego projektowania parametrów procesu iniekcji.

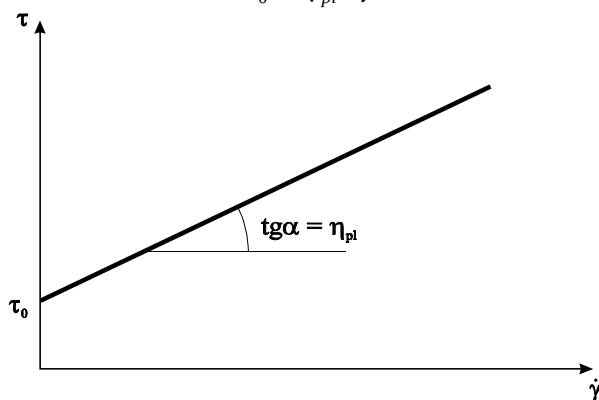
1. Modele reologiczne cementowej mieszanki iniekcyjnej

Mieszanka iniekcyjna rozumiana jest jako dyspersja cząstek stałych w cieczy, przy czym cząstki stałe stanowią ziarna cementu z ewentualnym niewielkim dodatkiem innych materiałów mineralnych jak wapno czy mikrokrzemionka, natomiast fazą dyspergującą jest woda zarobowa. Cząstki cementu w wodzie tworzą dzięki siłom kohezji układ przestrzenny, charakteryzujący się występowaniem strukturalnej wytrzymałości, jeśli naprężenia powstające pod wpływem sił zewnętrznych nie przekraczają pewnej minimalnej wartości określanej jako granica ścinania (płynności) τ_0 . Po jej przekroczeniu mieszanka iniekcyjna

ulega odkształceniom postaciowym jak ciała ciekłe, w trakcie których pojawiają się opory przepływu, których miarą jest lepkość plastyczna η_{pl} .

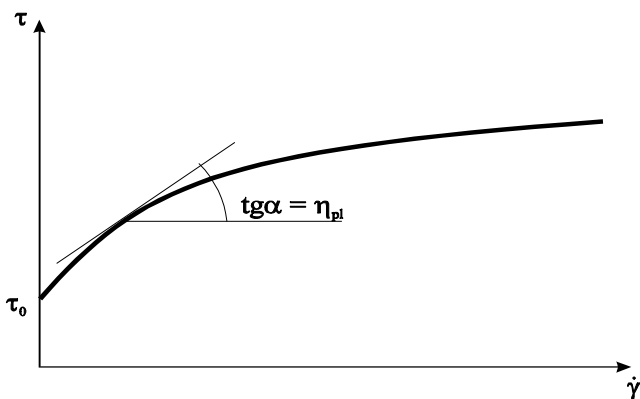
Wymienione parametry reologiczne występują w modelu przepływu ciała Binghama, przedstawionym na wykresie 1. Granica ścinania τ_0 wyznaczana jest przez punkt przecięcia prostej z osią naprężeń stycznych τ , zaś lepkość η_{pl} jest tangensem kąta nachylenia prostej do osi prędkości odkształceń $\dot{\gamma}$. Reologiczne równanie stanu ciała Binghama jest następujące:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}, \quad (1)$$



Wykres 1. "Krzywa" płynięcia ciała Binghama.

Rzeczywisty obraz płynięcia zaczynów cementowych odbiega często od prostopadłościowego, opisanego modelem ciała Binghama, ze względu na obserwowane zjawisko spadku wartości lepkości pozornej przy wzroście prędkości ścinania, nazywane rozrzedzaniem przy ścinaniu (wykres 2).



Wykres 2. Charakter płynięcia płynu rozrzedzanego ścinaniem

Zjawisko to występuje szczególnie wyraźnie przy bardziej skoncentrowanych dyspersjach cementowych i tłumaczone jest między innymi rozpadaniem się struktur flokulentnych, tworzonych przez cząstki cementu. Mniejsze cząstki o kształtach bardziej kulistych stawiają mniejszy opór przy ścinaniu, co pociąga za sobą zmniejszenie lepkości układu. Poza tym wszystkie cząstki stałe o kształcie wrzecionowatym i podłużnym, rozmieszczone początkowo bezładnie, w trakcie płynięcia zaczynają układać się wzdłużnie, co również wpływa na zmniejszenie oporów wewnętrznych podczas przepływu. Dodatkowy spadek lepkości powodowany jest przez zachodzący przy ścinaniu efekt uwalniania wody błonkowej i związanej w mostkach kapilarnych, zwiększającej ilość wody wolnej. Istnieje wiele matematycznych funkcji opisujących krzywą płynięcia przedstawioną na wykresie 2. Najbardziej ogólne równanie Szulmana (Cassona) ma postać:

$$\tau^{\frac{1}{n}} = \tau_0^{\frac{1}{n}} + (\eta_{pl} \cdot \dot{\gamma})^{\frac{1}{m}} \quad (2)$$

Niektóre inne tego typu modele to:

- model Herschela-Bulkley'a

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

- model Robertsona-Stiffa:

$$\tau = A \cdot (\dot{\gamma} + C)^B \quad (4)$$

- model półliniowy Mierzwy:

$$\tau = \tau_{02} + \eta_{p2} \cdot \dot{\gamma}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

2. Modelowanie oporów przepływu natury tarciowej

W przypadku cieczy niedyspersyjnych, o oporach płynięcia stanowi lepkość cieczy η oraz (dla płynów nienewtonowskich) granica ścinania τ_0 . Opis ten odzwierciedla opory natury spójnościowej τ_c i lepkościowej τ_η . Ciecze dyspersyjne wykazują ponadto opory natury tarciowej τ_f , występujące na stykach wzajemnie przemieszczających się względem siebie cząstek stałych. Sumaryczny opór ścinania można więc zapisać w postaci:

$$\tau = \tau_c + \tau_\eta + \tau_f \quad (6)$$

Zgodnie z analizą prowadzoną w [7] dla mieszanek betonowych, wielkość oporów tarciowych τ_f zależy od wielkości powierzchni styków cząstek stałych w płaszczyźnie ścinania, wielkości naprężeń normalnych w tej płaszczyźnie oraz kąta tarcia wewnętrznego, według zależności:

$$\tau_f = \sigma \cdot (1 - m^*) \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (7)$$

w której σ jest naprężeniem normalnym w płaszczyźnie ścinania, $tg\varphi$ jest kątem tarcia wewnętrznego, m^* – stosunkiem pola powierzchni, w której brak styku ziaren do całej powierzchni ścięcia.

W celu uzyskania większej przejrzystości powyższej zależności, w dalszej części pracy będzie ona wykorzystywana w następującej postaci:

$$\tau_f = \sigma \cdot m \cdot tg\varphi. \quad (8)$$

Wówczas m oznacza stosunek pola powierzchni styku ziaren do całej powierzchni ścięcia.

Zakładając, że naprężenia normalne w płaszczyźnie ścinania są proporcjonalne do wielkości ciśnienia osiowego p , ze współczynnikiem rozporu bocznego λ , można zapisać:

$$\tau_f = \lambda \cdot p \cdot m \cdot tg\varphi, \quad (9)$$

W dalszej części artykułu iloczyn parametrów λ , m , $tg\varphi$ w równaniu (9) opisujących stan struktury mieszanki zostanie zastąpiony stałą k , stąd:

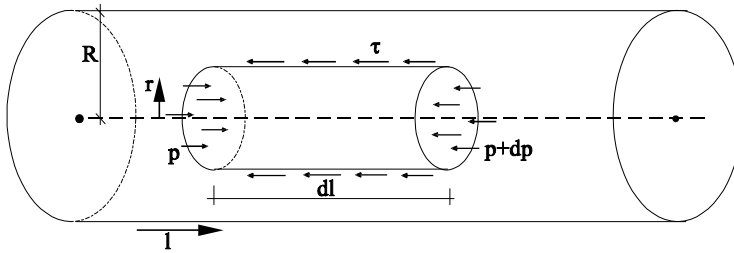
$$\tau_f = k \cdot p, \quad (10)$$

gdzie: $k = \lambda \cdot m \cdot tg\varphi$.

3. Przepływ w kanałach cylindrycznych

Tok postępowania przy konstruowaniu równań przepływu, stanowiący fragment prezentowanego rozwiązania jest analogiczny do znanych metod. Jednak ze względu na występujące istotne różnice, wynikające z przyjętych równań konstytutywnych i warunków brzegowych, rozwiązanie zagadnienia przepływu cieczy dyspersyjnej w przewodach kołowych zostanie przedstawione w całości.

Rozkład naprężeń w przekroju kanału kołowego wyznacza się rozpatrując walcowy fragment cieczy w przewodzie tłocznym i ustalając warunki równowagi takiego elementu (rys. 1)



Rys. 1. Schemat analizowanego elementu do wyznaczania rozkładu naprężeń stycznych w kanale tłocznym o przekroju kołowym.

$$p \cdot \pi r^2 = (p + dp) \cdot \pi r^2 + \tau \cdot 2\pi r \cdot dl \quad (11)$$

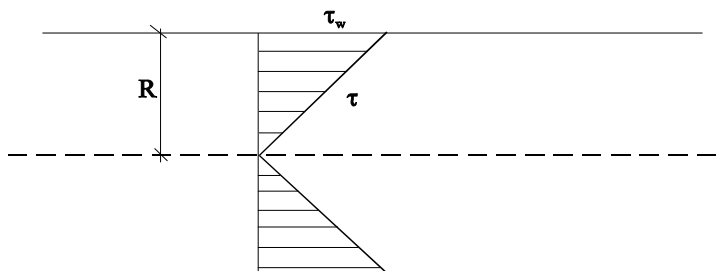
a po uproszczeniach:

$$\tau = -\frac{dp}{dl} \cdot \frac{r}{2} \quad (12)$$

Wobec tego, że ciśnienie w przekroju kapilary jest stałe, zatem naprężenia ścinające w przekroju kanału zmieniają się liniowo wzdłuż promienia i wzrastają od zera w osi do wartości τ_w przy ścianie (p. rys. 2), gdzie osiągają wielkość:

$$\tau_w = -\frac{dp}{dl} \cdot \frac{R}{2} \quad (13)$$

Znak „minus” w powyższych równaniach oznacza, że w kanale zachodzi spadek ciśnienia, a więc gradient $\frac{dp}{dl}$ jest ujemny.



Rys. 2. Rozkład naprężeń stycznych w przekroju kapilary.

Natężenie przepływu w kanale kołowym jest dane wzorem:

$$Q = \int_0^Q dQ = 2\pi \int_0^R v \cdot r \cdot dr \quad (14)$$

ponieważ:

$$2rdr = d(r^2) \quad (15)$$

można zapisać:

$$Q = \pi \int_0^R v \cdot d(r^2) \quad (16)$$

a po scałkowaniu:

$$Q = \left[v \cdot r^2 - \int r^2 \cdot dv \right]_0^R \quad (17)$$

Zgodnie z założeniami, prędkość przepływu przy ścianie wynosi zero ($v(R) = 0$), a więc wyrażenie $v \cdot r^2$ jest również równe zero. Zgodnie z założeniem reostabilności mieszanki iniekcyjnej

$$dv = -f(\tau) \cdot dr \quad (18)$$

zaś z porównania równań (12) i (13) wynika, że:

$$r = R \cdot \frac{\tau}{\tau_w} \quad (19)$$

oraz:

$$dr = R \cdot \frac{d\tau}{\tau_w} \quad (20)$$

Podstawiając zależności (18), (19) i (20) do równania (17) i kładąc $R = D/2$ otrzymuje się:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^3}{8\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} f(\tau) \cdot \tau^2 d\tau \quad (21)$$

Powyższe równanie jest ogólnym równaniem przepływu w kanale o przekroju kołowym, w którym postać zależności funkcyjnej $f(\tau)$ uzależniona jest od przyjętego modelu reologicznego cieczy.

Ponadto, z równania ciągłości przepływu wynika związek:

$$Q = v_{sr} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (22)$$

3.1. Model Binghama z pominięciem oporów tarcowych

Dla ciał Binghama równania konstytutywne przyjmują postać:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{pl} \frac{dv}{dr}, \quad \text{gdy } \tau > \tau_0 \quad (23)$$

$$\frac{dv}{dr} = 0, \quad \text{gdy } \tau \leq \tau_0 \quad (24)$$

zatem funkcję $f(\tau)$ z równania (21) można zapisać następująco:

$$f(\tau) = \begin{cases} \frac{\tau - \tau_0}{\eta_{pl}} & \tau > \tau_0 \\ 0 & \tau \leq \tau_0. \end{cases} \quad (25)$$

Uwzględniając (25) w (21) otrzymuje się:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^3}{8\eta_{pl} \cdot \tau_w^3} \cdot \int_{\tau_0}^{\tau_w} (\tau^3 - \tau_0 \cdot \tau^2) d\tau \quad (26)$$

a po scałkowaniu:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^3}{8\eta_{pl}} \left(\frac{\tau_w}{4} - \frac{\tau_0}{3} + \frac{\tau_0^4}{12\tau_w^3} \right) \quad (27)$$

Ostatni składnik w nawiasie równania (27) można pominąć z niewielkim błędem dla poprawności rozwiązania. Podstawiając ponadto zależność (22) do równania (27) uzyskujemy:

$$v_{sr} = -\frac{D}{2\eta_{pl}} \left(\frac{D}{16} \cdot \frac{dp}{dl} + \frac{\tau_0}{3} \right) \quad (28)$$

Podstawiając wyrażenie (13) oraz dokonując uporządkowania względem p , otrzymuje się równanie różniczkowe postaci:

$$\frac{dp}{dl} + \frac{16(6v_{sr} \cdot \eta_{pl} + D \cdot \tau_0)}{3D^2} = 0 \quad (29)$$

Po scałkowaniu tego równania i uwzględnieniu warunku początkowego $p(0) = P_0$ otrzymuje się rozwiązanie równania przepływu w postaci:

$$p(l) = P_0 - \frac{16(6\eta_{pl} \cdot v_{sr} + D \cdot \tau_0)}{3D^2} \cdot l \quad (30)$$

Równanie to odnosi się do ruchu ustalonego mieszanki iniekcyjnej w kanale o przekroju kołowym i wiąże parametry technologiczne instalacji ciśnieniowej (P_0), parametry geometryczne (D) oraz parametry reologiczne (τ_0 , η_{pl}). Pozwala ono na wyznaczenie wartości ciśnienia tłocznego, panującego w dowolnym punkcie kanału tłocznego, określonym przez jego odległość od punktu początkowego. Na tej podstawie można wyznaczyć maksymalną odległość tłoczenia L (zasięg tłoczenia) przy ustalonych parametrach równania. Należy w tym celu rozpatrzeć stan równowagi strumienia cieczy iniekcyjnej w chwili zastopowania przepływu wskutek narastających wzdłuż osi kanału strat ciśnienia. Na długości nieruchomego (zastopowanego) strumienia ciśnienie spada od wartości początkowej P_0 do wartości końcowej P_k na tyle małej, że nie wystarcza do pokonania granicy ścinania mieszanki iniekcyjnej. Przyjmuje się w przybliżeniu, że ciśnienie tłoczne spada do zera w odległości L oznaczającej zasięg tłoczenia. Stąd wynika warunek brzegowy: $p(L) = 0$. Prędkość przepływu w chwili jego zablokowania jest równa 0. Po uwzględnieniu tych warunków, zasięg tłoczenia wyniesie:

$$L = \frac{3DP_0}{16\tau_0} \quad (31)$$

3.2. Model Binghama z uwzględnieniem oporów tarcowych

W celu uproszczenia zapisów przyjmujemy oznaczenie:

$$\tau_1 = \tau_0 + kp \quad (32)$$

Równania konstytutywne przyjmują teraz postać:

$$\tau = \tau_1 + \eta_{pl} \frac{dv}{dr}, \quad \text{gdy } \tau > \tau_1 \quad (33)$$

$$\frac{dv}{dr} = 0, \quad \text{gdy } \tau \leq \tau_1 \quad (34)$$

zatem funkcję $f(\tau)$ z równania (21) można zapisać następująco:

$$f(\tau) = \begin{cases} \frac{\tau - \tau_1}{\eta_{pl}} & \tau > \tau_1 \\ 0 & \tau \leq \tau_1. \end{cases} \quad (35)$$

Po podstawieniu (35) do (21) mamy:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^3}{8\eta_{pl} \cdot \tau_w^3} \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_w} (\tau^3 - \tau_1 \cdot \tau^2) d\tau \quad (36)$$

Po scałkowaniu uzyskuje się zależność:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^3}{8\eta_{pl}} \left(\frac{\tau_w^4}{4} - \frac{\tau_1}{3} \tau_w^3 - \frac{\tau_1^4}{4\tau_w^3} + \frac{\tau_1 \cdot \tau_0^3}{3\tau_w^3} \right) \quad (37)$$

Sumę dwóch ostatnich członów w nawiasie równania (37) można pominąć z niewielkim błędem dla poprawności rozwiązania. Uwzględniając ponadto zależność (22) uzyskujemy:

$$v_{sr} = -\frac{D}{2\eta_{pl}} \left(\frac{D}{16} \cdot \frac{dp}{dl} + \frac{\tau_1}{3} \right) \quad (38)$$

Podstawiając w powyższym wyrażeniu (32) oraz porządkując względem p , otrzymuje się równanie różniczkowe liniowe pierwszego rzędu:

$$\frac{dp}{dl} + \frac{16k}{3D} p + \frac{16(6v_{sr} \cdot \eta_{pl} + D \cdot \tau_0)}{3D^2} = 0 \quad (39)$$

Rozwiązaniem ogólnym równania (39) jest funkcja:

$$p(l) = -\frac{6\eta_{pl} \cdot v_{sr} + \tau_0 \cdot D}{D \cdot k} + c \cdot e^{-\frac{16k}{3D} \cdot l} \quad (40)$$

Z warunku początkowego $p(0) = P_0$ otrzymuje się rozwiązanie równania przepływu w postaci:

$$p(l) = -\frac{6\eta_{pl} \cdot v_{sr} + \tau_0 \cdot D}{D \cdot k} + \left(P_0 + \frac{6\eta_{pl} \cdot v_{sr} + \tau_0 \cdot D}{D \cdot k} \right) \cdot e^{-\frac{16k}{3D} \cdot l} \quad (41)$$

Podobnie jak w poprzednim modelu, warunek brzegowy $p(L) = 0$ oraz to, że prędkość przepływu w chwili jego zablokowania jest równa 0, pozwalają na wyznaczenie zasięgu tłoczenia. Jest on w tym przypadku równy:

$$L = \frac{3D}{16k} \cdot \ln \left(\frac{P_0 \cdot k}{\tau_0} + 1 \right) \quad (42)$$

3.3. Model Herschela-Bulkley'a

W celu uproszczenia zapisów przyjmujemy następujące oznaczenie:

$$\tau_1 = \tau_0 + \tau_f. \quad (43)$$

Równania konstytutywne są postaci:

$$\tau = \tau_1 + \eta_{pl} \left(\frac{dv}{dr} \right)^n, \quad \text{gdy } \tau > \tau_1, \quad (44)$$

$$\frac{dv}{dr} = 0, \quad \text{gdy } \tau \leq \tau_1. \quad (45)$$

Funkcja $f(\tau)$ z równania (21) jest więc postaci:

$$f(\tau) = \begin{cases} \left(\frac{\tau - \tau_1}{\eta_{pl}} \right)^{\frac{1}{n}} & \tau > \tau_1 \\ 0 & \tau \leq \tau_1. \end{cases} \quad (46)$$

Po podstawieniu (46) do (21) mamy:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^3}{8\eta_{pl}^{\frac{1}{n}} \cdot \tau_w^3} \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_w} \tau^2 (\tau - \tau_1)^{\frac{1}{n}} d\tau \quad (47)$$

Aby wyliczyć natężenie przepływu Q rozważmy całkę nieoznaczoną $\int \tau^2 (\tau - \tau_1)^{\frac{1}{n}} d\tau$. W celu policzenia tej całki należy wprowadzić nową zmienną wzorem $\tau - \tau_1 = s^n$. Mamy więc:

$$\int \tau^2 (\tau - \tau_1)^{\frac{1}{n}} d\tau = n \int s^n (\tau_1 + s^n)^2 ds = n \left(\tau_1^2 \frac{s^{n+1}}{n+1} + 2\tau_1 \frac{s^{2n+1}}{2n+1} + \frac{s^{3n+1}}{3n+1} \right)$$

i ostatecznie:

$$\int \tau^2 (\tau - \tau_1)^{\frac{1}{n}} d\tau = n(\tau - \tau_1)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\tau_1^2 (\tau - \tau_1)}{n+1} + \frac{2\tau_1 (\tau - \tau_1)^2}{2n+1} + \frac{(\tau - \tau_1)^3}{3n+1} \right)$$

Po uwzględnieniu tych rachunków w (3.37) uzyskuje się zależność:

$$Q = \frac{n\pi D^3}{8(3n+1)\eta_{pl}^{\frac{1}{n}}} \sqrt[n]{\tau_w - \tau_1} \cdot B, \quad (48)$$

gdzie:

$$B = 1 - \frac{1}{(2n+1)} \frac{\tau_1}{\tau_w} - \frac{2n}{(n+1)(2n+1)} \frac{\tau_1^2}{\tau_w^2} - \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \frac{\tau_1^3}{\tau_w^3} \quad (49)$$

Przybliżoną wartość Q otrzymać można pomijając w powyższym wyrażeniu wszystkie składniki, w których τ_w występuje w mianowniku. Przyjmujemy więc, że:

$$Q = \frac{n\pi D^3}{8(3n+1)\eta_{pl}^{\frac{1}{n}}} \sqrt[n]{\tau_w - \tau_1} \quad (50)$$

Podstawiając w (50) zależność (22) otrzymujemy, że v_{sr} dane jest wzorem

$$v_{sr} = \frac{nD}{2(3n+1)\eta_{pl}^{\frac{1}{n}}} \sqrt[n]{\tau_w - \tau_1} \quad (51)$$

skąd można uzyskać równanie:

$$\frac{D}{4} \cdot \frac{dp}{dl} + kp + \tau_0 + \frac{v_{sr}^n 2^n (3n+1)^n \eta_{pl}}{D^n n^n} = 0 \quad (52)$$

Po uproszczeniu zapisu otrzymujemy:

$$\frac{dp}{dl} + \frac{4k}{D} p = -\frac{4}{D} \left(\tau_0 + \frac{v_{sr}^n \eta_{pl}}{D^n} w \right) \quad (53)$$

gdzie:

$$w = \left(\frac{2(3n+1)}{n} \right)^n \quad (54)$$

Podobnie jak w modelu Bingham'a z uwzględnieniem oporów tarcia otrzymujemy równanie różniczkowe liniowe pierwszego rzędu. Jego rozwiązaniem ogólnym jest funkcja:

$$p(l) = c \cdot e^{-\frac{4k}{D} \cdot l} - \frac{1}{k} \left(\tau_0 + \frac{v_{sr}^n \eta_{pl}}{D^n} w \right) \quad (55)$$

Z warunku początkowego $p(0) = P_0$ otrzymuje się rozwiązanie równania przepływu w postaci:

$$p(l) = -\frac{1}{k} \left(\tau_0 + \frac{v_{sr}^n \eta_{pl}}{D^n} w \right) + \left(P_0 + \frac{1}{k} \left(\tau_0 + \frac{v_{sr}^n \eta_{pl}}{D^n} w \right) \right) \cdot e^{-\frac{4k}{D} \cdot l} \quad (56)$$

Po uwzględnieniu warunku brzegowego obliczamy zasięg tłoczenia:

$$L = \frac{D}{4k} \cdot \ln \left(\frac{P_0 \cdot k}{\tau_0} + 1 \right). \quad (57)$$

4. Analiza równań przepływu

Z praktycznego punktu widzenia kluczowe znaczenie ma rozkład ciśnienia tłocznego na długości przewodu i związany z tym zasięg tłoczenia L . Przyjęcie różnych modeli reologicznych prowadzi do uzyskania różnych postaci równań

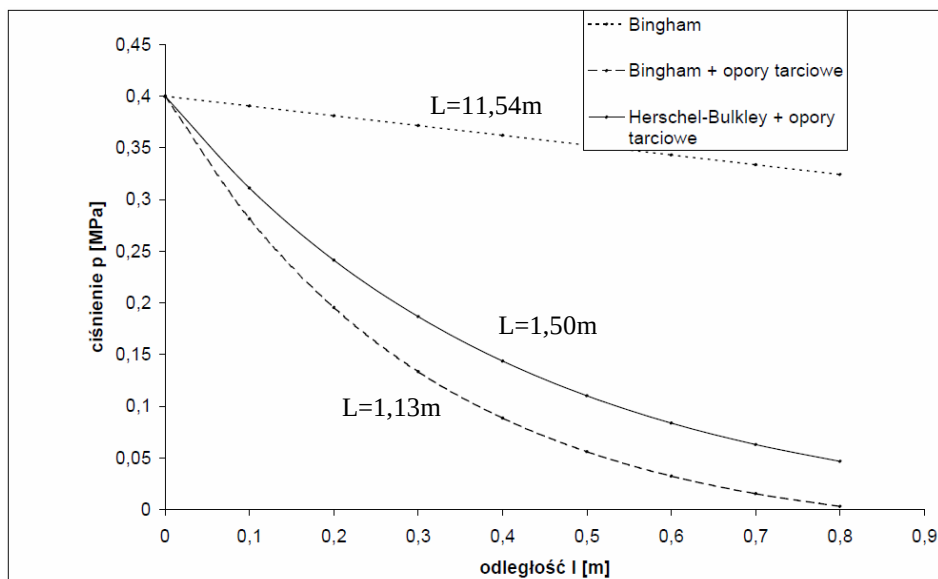
przepływu, a co za tym idzie, także różnic w przewidywanych wynikach procesu iniekcji. Warto jednak zaznaczyć, że w odniesieniu do dwóch podstawowych parametrów reologicznych zasięg tłoczenia nie zależy od lepkości η_{pl} , ale jedynie od granicy ścinania τ_0 . Taka sytuacja ma miejsce w każdym z analizowanych modeli. Potwierdza to spostrzeżenia zawarte w [8].

Dla celów porównawczych przyjęto następujące wartości występujących w równaniach przepływu parametrów:

parametry technologiczne	$P_0 = 0,4 \text{ MPa}$	$D = 2,0 \text{ mm}$	$v_{sr} = 0,05 \text{ m/s}$
podstawowe parametry reologiczne	$\tau_0 = 13,0 \text{ Pa}$	$\eta_{pl} = 0,15 \text{ Pa}\cdot\text{s}$	$n = 0,5 \text{ MPa}$
parametry tarciove	$\lambda = 0,94$	$tg \varphi = 0,03$	$m = 0,043$

Poszczególne wielkości zostały określone na podstawie własnych danych doświadczalnych (parametry reologiczne i tarciove) oraz praktycznych zastosowań iniekcji ciśnieniowej (parametry technologiczne).

Zmiana ciśnienia tłocznego p na długości przewodu l oraz zasięg tłoczenia L , obliczone na podstawie trzech wyprowadzonych w rozdziale 3 równań przepływu zostały przedstawione na wykresie 3. Pominięcie oporów tarciowych w klasycznym modelu Binghama skutkuje uzyskaniem nadmiernie dużych w stosunku do obserwowanych w praktyce wartości zasięgu tłoczenia. Bliższe rzeczywistym możliwościom dyspersji cementowych są wyniki obliczeń uzyskane na podstawie modeli, które uwzględniają tarciove opory przepływu. Występowanie nieco mniejszych oporów przepływu przewiduje model reologiczny Herschela-Bulkleya, uwzględniający obserwowane w rzeczywistości zjawisko tzw. rozrzedzania ścinaniem, a więc zmniejszanie się wartości lepkości w trakcie płynięcia. Jednakże obserwowane różnice w wynikach obliczeń nie są w tym przypadku szczególnie duże.



Wykres 3. Porównanie wyników obliczeń zmian ciśnienia tłocznego p oraz zasięgu tłoczenia L , dla przyjętych trzech modeli reologicznych

5. Podsumowanie

Model ciała Bingham nie oddaje w sposób dokładny rzeczywistego zachowania się dyspersji cementowych, w trakcie przepływu iniekcyjnego. W warunkach ciśnień panujących w procesie iniekcji, rzędu $0,2 \div 0,6$ MPa, dużą rolę odgrywają opory przepływu o charakterze tarciowym. Wielkość tych oporów zależy od wielkości ciśnienia tłocznego, płynności mieszanki iniekcyjnej, wielkości kanału tłocznego. Modele dyspersyjnej mieszanki iniekcyjnej, przedstawione w pracy, uwzględniające składnik oporów tarcia na stykach ziaren cząstek stałych, pełniej opisują zjawiska zachodzące w trakcie jej tłoczenia.

Otrzymane równania przepływu wiążą parametry reologiczne, geometryczne i technologiczne, pozwalając na rozpoznanie zależności pomiędzy nimi i bardziej świadome projektowanie procesu iniekcji.

LITERATURA

1. Happel J.: Viscous flow in multiparticle systems: Slow motion of fluids relative to beds of spherical particles. *AIChE Journal* 4. No 2 1958.
2. Hammad K. J., Vradis G. C.: Creeping flow of a Bingham plastic through axisymmetric sudden contractions with viscous dissipation. *Journal of Heat Mass Transfer*. V. 39. No 8 1996.
3. Mierzwa J.: Właściwości reologiczne zaczynów cementowych stosowanych w wybranych procesach technologicznych budownictwa. Monografia. Politechnika Krakowska, 1988.
4. Szaferin J.: Dyspersje cementowe w procesie iniekcyjnej naprawy defektów striktury betonu. Monografia. Politechnika Lubelska, 2011.
5. Chin W.C.: *Computational Rheology for Pipeline and Annular Flow*. Gulf Professional Publishing, Boston, 2001.

6. Chen Z., Huan G., Ma Y.: Computational Methods for Multiphase Flow in porous Media. SIAM. Philadelphia, 2006.
7. Szwabowski J.: Urabialność mieszanki betonowej w ujęciu reologicznym. ZN Politechniki Śląskiej. Gliwice 1987.
8. Hansson P.: Filtration stability of cementitious injection grouts with low w/c-ratio. Concrete Repair, Rehabilitation and Protection. London 1996.

ANALITICAL DESCRIPTION OF ANNULAR FLOW OF THE CEMENT DISPERSION

Abstract

The analytical solutions for pipeline and annular flow of the cement dispersion for three rheological models were presented in the paper. The calculations of the pressure gradient and injection range shows that it is necessary to take into account the friction factor in the theoretical analysis of the cement grout flow.

Keywords: cement dispersion, flow, modelling

ANALITYCZNY OPIS PRZEPŁYWU DYSERSJI CEMENTOWEJ W PRZEWODACH KOŁOWYCH

Streszczenie

W artykule zaprezentowano rozwiązania analityczne przepływu dyspersji cementowej w prostoliniowych przewodach kołowych, dla przyjętych trzech modeli reologicznych. Przeprowadzone obliczenia rozkładu ciśnienia tłocznego oraz zasięgu przepływu wskazują na konieczność uwzględniania oporów natury tarciowej w analizie przepływu cementowej mieszanki iniekcyjnej.

Słowa kluczowe: dyspersja cementowa, przepływ, modelowanie

Dr inż. Jerzy SZERAFIN
Katedra Konstrukcji Budowlanych
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38D
e-mail: j.szerafin@pollub.pl

Dr Paweł ZAPRAWA
Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38D
e-mail: p.zaprawa@pollub.pl

SYMULACJA ZUŻYWANIA ŁOŻYSKA ŚLIZGOWEGO Z NIEKOŁOWOŚCIĄ KONTURÓW. CZĘŚĆ 1. UOGÓLNIONY MODEL LINIOWY ZUŻYWANIA

Wstęp

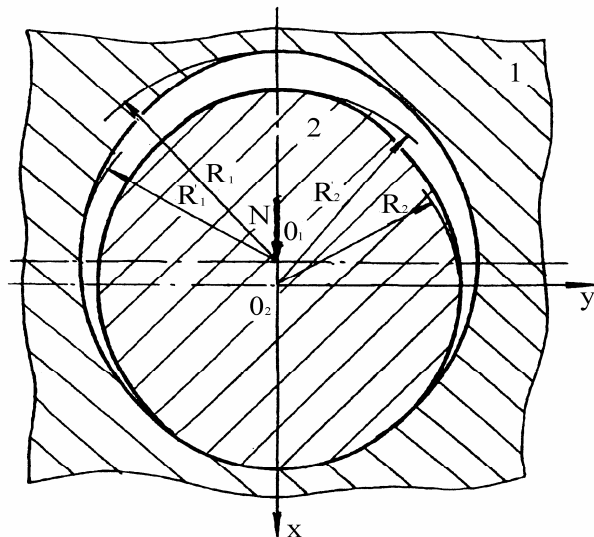
Łożyska ślizgowe znajdują zastosowanie w budowie maszyn. Znany jest fakt, że przy wyprodukowaniu części łożysk (wałów i tulei) występują odchyłki ich konturów od kołowości w postaci owalności, trójgraniastości tj. Znane w literaturze metody rozwiązania zagadnień stykowo – tarciovych [1 – 5] dla takiego układu tribologicznego nie uwzględniają tego. Na podstawie znanej metody badania kinetyki zużycia przy tarcii ślizgowej [1] opracowano model matematyczny liniowy zużycia łożyska ślizgowego z małą niekołowością konturu tulei i przebadano wpływ jej owalności na trwałość oraz zużycie [6 – 8,10,11]. Poniżej przedstawiono uogólnioną wersję tego modelu uwzględniającą niekołowość obu elementów łożyska.

1. Sformułowanie zagadnienia kontaktowego

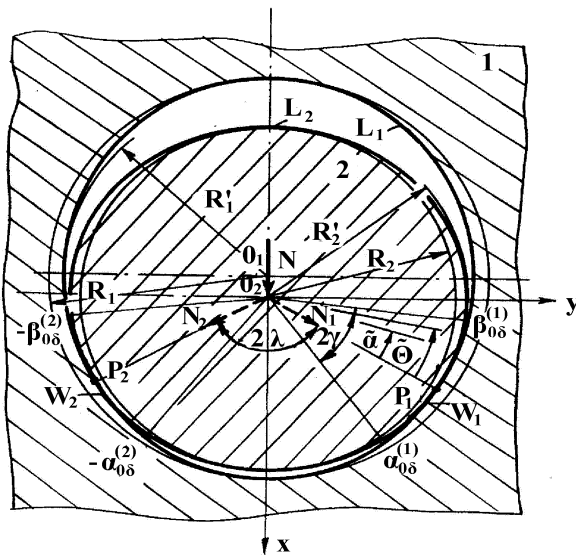
Schemat obliczeniowy łożyska, gdzie występuje styk mieszany podano na rys. 1. Wstępnie (rys. 1a) występuje symetryczny styk jednoobszarowy. Kolejno przy zwiększeniu kąta obrotu wału α_2 powstaje najpierw niesymetryczny styk jednoobszarowy, a od pewnej jego wartości – niesymetryczny styk dwuobszarowy i dalej symetryczny styk dwuobszarowy ($\alpha_2 = 90^\circ$) (rys. 1b).

Wał 2 oraz tuleja 1 mają małą wstępną niekołowość konturów $\delta_k \ll R_k$ (owalność, trójgraniastność, czterograniastność), gdzie k – numeracja ciał. Odpowiednio $\delta_1 = R_1 - R'_1$, $\delta_2 = R'_2 - R_2$, a $R_1 = a_1$ - większa półoś otworu w tulei, $R'_1 = b_1$ - jego mniejsza półoś, $R'_2 = a_2$ - większa półoś przekroju wału, $R_2 = b_2$ - jego mniejsza półoś. W łożysku jest luz promieniowy $\varepsilon = R_1 - R_2 > 0$. Czop wału jest obciążony siłą promieniową N . Wał obraca się z prędkością kątową $\omega_2 = \text{const}$ a pod wpływem obciążenia w strefie styku powstaje siła tarcia

powodująca zużycie elementów łożyska. Właściwości sprężyste materiałów wału i tulei oraz ich odporność na zużycie nie są jednakowe.



a)



b)

Rys. 1. Schemat obliczeniowy łożyska ślizgowego z owalnością konturów

W przypadku symetrycznego styku jednoobszarowego ($\alpha_2 = 0$) jego parametrami są: kąt kontaktu $2\alpha_{0\delta}$, maksymalne naciski stykowe $p(0, \delta)$, strefa kontaktu $W = 2\alpha_{0\delta} R_2$. W przypadku symetrycznego styku dwuobszarowego (rys. 1b) w strefach styku $W_1 = W_2 = 2\gamma R_2$ powstają naciski stykowe, które osiągają wartości maksymalne $p(\lambda, \delta)$ na linii działania sił $N_1 = N_2 = N / (2 \cos \lambda)$. Kąt styku wstępnego 2λ jest nieznan i określa się według opracowanych metod [9]. Przy niesymetrycznym styku dwuobszarowym siły $N_1 \neq N_2$, kąty $\lambda_1 \neq \lambda_2$, kąty kontaktu $2\gamma_1 \neq 2\gamma_2$, naciski stykowe $p(\lambda_1, \delta) \neq p(\lambda_2, \delta)$ zależą od kąta obrotu α_2 wału.

2. Uogólniony liniowy model zużycia

Model liniowy zużycia [1] zawiera:

a) Układ równań różniczkowych zużycia:

$$\frac{1}{v} \frac{dh_1}{dt} = \Phi_1^{-1}(\tau), \quad \frac{1}{v} \frac{dh_2}{dt} \Phi_2(\tau) = \Phi_2^{-1}(\tau), \quad (1)$$

gdzie: v – prędkość poślizgu;

h_1, h_2 – zużycia liniowe elementów układu tribologicznego;

t – czas zużycia;

$\Phi(\tau)$ – charakterystyczna funkcja odporności materiałów na zużycie dla wybranych warunków zużycia;

$L = vt$ – droga tarcia.

b) Wzór Amontonsa – Coulomba na jednostkową siłę tarcia τ :

$$\tau = fp, \quad (2)$$

gdzie: f – współczynnik tarcia ślizgowego.

c) Wyraz na określenie wartości doświadczalnej funkcji $\Phi_i(\tau_i)$ odporności materiałów na zużycie

$$\Phi_i(\tau_i) = L_i / h_i, \quad (3)$$

gdzie: h_i – zużycie liniowe ustalone na drodze doświadczalnej.

d) Wyraz aproksymujący wartości funkcji $\Phi_i(\tau_i)$:

$$\Phi_k(\tau) = B_k \frac{\tau_{k0}^{m_k}}{(\tau - \tau_{k0})^{m_k}}, \quad k = 1; 2, \quad (4)$$

gdzie: B_k, m_k, τ_{k0} – wskaźniki odporności materiałów na zużycie w wybranej parze tribologicznej oraz warunkach doświadczalnych.

Równanie na ustalenie nacisków stykowych dla przypadków symetrycznego styku jednoobszarowego oraz dwuobszarowego ma postać [9]:

$$\begin{aligned} & k_1 \int_{\tilde{\alpha}_{\min}}^{\tilde{\alpha}_{\max}} \cot \frac{\tilde{\alpha} - \tilde{\theta}}{2} p'(\tilde{\alpha}, \delta) d\tilde{\theta} - k_3 \int_{\tilde{\alpha}_{\min}}^{\tilde{\alpha}_{\max}} p(\tilde{\alpha}, \delta) d\tilde{\alpha} - k_4 \cos \tilde{\alpha} \int_{\tilde{\alpha}_{\min}}^{\tilde{\alpha}_{\max}} p(\tilde{\alpha}, \delta) \cos \tilde{\alpha} d\tilde{\alpha} = \\ & = -\frac{\varepsilon}{R^2} \left[1 - \frac{\delta_1}{2\varepsilon} D_1(\alpha) - \frac{\delta_2}{2\varepsilon} D_2(\alpha) \right], \quad p' = dp/d\alpha, \quad \tilde{\alpha}_{\min} \leq \tilde{\alpha} \leq \tilde{\alpha}_{\max}, \end{aligned} \quad (5)$$

a) styk jednoobszarowy:

$$\tilde{\alpha} = \alpha, \quad \tilde{\theta} = \theta, \quad 0 \leq \tilde{\alpha} \leq \theta, \quad 0 \leq \theta \leq \alpha_{0\delta}, \quad -\alpha_{0\delta} \leq \tilde{\alpha} \leq \alpha_{0\delta}; \quad R = R_2;$$

b) styk dwuobszarowy:

$$\tilde{\alpha} = \lambda + \alpha, \quad \tilde{\theta} = \lambda + \theta, \quad 0 \leq \tilde{\alpha} \leq \tilde{\theta}, \quad 0 \leq \tilde{\theta} \leq \gamma, \quad \gamma_1 \leq \tilde{\alpha} \leq \gamma_2, \quad \gamma_{1,2} = \lambda \pm 0,5(\beta_{0\delta}^{(1)} - \alpha_{0\delta}^{(1)});$$

$$k_1 = \frac{1}{8\pi} \left(\frac{1 + \kappa_1}{G_1 R_1} + \frac{1 + \kappa_2}{G_2 R_2} \right), \quad k_3 = \frac{1 + \kappa_1}{8\pi G_1 R_1}, \quad k_4 = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\kappa_1}{G_1 R_1} + \frac{1}{G_2 R_2} \right), \quad \kappa = 3 - 4\mu;$$

G, μ – moduł sprężystości postaciowej i współczynnik Poissona;

$D_1(\alpha), D_2(\alpha)$ – charakterystyki niekołowości zarysów otworu i wału [9].

W celu rozwiązania równania (5) wykorzystano metodę kolokacji [1] z jednym punktem kolokacji $\tilde{\alpha} = 0,5\alpha_{0\delta}$ (styk jednoobszarowy) i $\tilde{\alpha} = 0,5\gamma$ (styk dwuobszarowy). Funkcję nacisków stykowych wybrano w postaci:

$$p(\alpha, \delta) \approx E_\delta \varepsilon_\delta \sqrt{tg^2 \frac{\alpha_{0\delta}}{2} - tg^2 \frac{\alpha}{2}}, \quad (6)$$

$$p(\lambda, \delta) \approx E_\delta \varepsilon_\delta \sqrt{tg^2 \frac{\gamma}{2} - tg^2 \frac{\tilde{\alpha} - \lambda}{2}}, \quad (7)$$

gdzie: $E_{\delta} = e_4 \cos^2 \frac{\tilde{\alpha}}{4} / R$, $\varepsilon_{\delta} = \varepsilon \Sigma_{\delta}$, $e_4 = 4E_1 E_2 / Z$

$E = 2G / (1 + \mu)$ – moduł Younga materiału

$Z = (1 + \kappa_1)(1 + \mu_1)E_2 + (1 + \kappa_2)(1 + \mu_2)E_1$

$\Sigma_{\delta} = 1 - \frac{\delta_1}{2\varepsilon} D_1(\alpha_1) - \frac{\delta_2}{2\varepsilon} D_2(\alpha_2)$, $\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ$ – styk symetryczny

$\Sigma_{\delta} = 1 - \frac{\delta_1}{2\varepsilon} D_1(\alpha_1) - \frac{\delta_2}{2\varepsilon} D_2(\alpha_2)$, $\alpha_1 = 0$, $0 < \alpha_2 < 360^\circ$ – styk niesymetryczny.

Największe maksymalne naciski stykowe $p(\alpha_2, \delta)$ w przypadku styku jednoobszarowego występują, gdy $\alpha_2 = 0$, a w przypadku styku jednoobszarowego – w dwóch punktach P_1 i P_2 (rys. 1b), położonych pod kątem 2λ .

Wtedy:

$$p(\alpha_2, \delta) \approx E_{\delta} \varepsilon_{\delta} \operatorname{tg} \frac{\alpha_{0\delta}(\alpha_2)}{2} \text{ – styk jednoobszarowy} \quad (8)$$

$$p(\alpha_2, \delta) \approx E_{\delta} \varepsilon_{\delta} \operatorname{tg} \frac{\gamma(\alpha_2)}{2} \text{ – styk dwuobszarowy} \quad (9)$$

Nieznany półkął kontaktu $\alpha_{0\delta}(\alpha_2)$ lub $\gamma_k(\alpha_2)$ wylicza się z warunku równowagi sił działających na wał:

$$N = 4\pi R_2 E_{\delta} \varepsilon_{\delta} \sin^2 \frac{\alpha_{0\delta}(\alpha_2)}{4} \text{ – styk jednoobszarowy} \quad (10)$$

$$N_1 = N_2 = 4\pi R_2 E_{\delta} \varepsilon_{\delta} \sin^2 \frac{\gamma(\lambda)}{4} \text{ – styk dwuobszarowy symetryczny} \quad (11)$$

gdzie: $N_1 = N_2 = N / 2 \cos \lambda$;

$$N_1 \neq N_2 = 4\pi R_2 E_{\delta} \varepsilon_{\delta} \sin^2 \frac{\gamma_s(\alpha_2)}{4} \text{ – styk dwuobszarowy niesymetryczny} \quad (12)$$

$$\text{gdzie: } N_{1\alpha_2} = N \frac{\sin(90^\circ + \lambda - \alpha_2)}{\sin(180^\circ - 2\lambda)}, \quad N_{2\alpha_2} = N \frac{\sin(-90^\circ + \lambda + \alpha_2)}{\sin(180^\circ - 2\lambda)} \quad (13)$$

$s = 1; 2$ – obszary styku; $\lambda_1 = \alpha_2 - (90 - \lambda)$, $\lambda_2 = -(2\lambda - \lambda_1)$ – kąty określające kierunek sił $N_{1\alpha_2}$, $N_{2\alpha_2}$, $\lambda_1 + \lambda_2 = 2\lambda$.

Naciski stykowe z uwzględnieniem zużycia określają się następująco [7]:

$$p(\alpha_2, \delta, h) = p(\alpha_2, \delta) + p(\alpha_2, h), \quad (14)$$

gdzie: $p(\alpha_2, h)$ – zmiana nacisków wskutek zużycia.

Według [7] $p(\alpha_2, h)$ przedstawia się następująco:

$$p(\alpha_2, h) = E_h \varepsilon_h \operatorname{tg} \frac{\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)}{2} \quad (15)$$

$$p(\alpha_2, h) = E_h \varepsilon_h \operatorname{tg} \frac{\gamma_{s\delta h}(\alpha_2)}{2} \quad (16)$$

gdzie: $E_h = e_4 \cos^2 \frac{\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)}{4} / R$, $E_h = e_4 \cos^2 \frac{\gamma_{s\delta h}(\alpha_2)}{4} / R$

Półką kontakt tribologicznego $\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)$ lub $\gamma_{s\delta h}(\alpha_2)$ ustala się na podstawie umów typu (10, 12):

$$N = 4\pi R_2 (E_\delta \varepsilon_\delta + E_h \varepsilon_h) \sin^2 \frac{\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)}{4} \quad (17)$$

$$N_1(N_2) = 4\pi R_2 (E_\delta \varepsilon_\delta + E_h \varepsilon_h) \sin^2 \frac{\gamma_{s\delta h}(\alpha_2)}{4} \quad (18)$$

gdzie $\varepsilon_h = h_k (\pm K_t^{(k)} \pm h'_k)$;

tutaj będzie “+”, gdy w wyniku zużycia naciski zwiększają się, a “-” – gdy maleją;

$h'_1 = h_2 / h_1$, $h'_2 = h_1 / h_2$ – zużycia względne;

K_t – współczynnik pokrycia wzajemnego;

$$h'_1 = \frac{\Phi_1(\tau)}{\Phi_2(\tau)} = \frac{B_1 \tau_{10}^{m_1} (\tau(0) - \tau_{20})^{m_2}}{B_2 \tau_{20}^{m_2} (\tau(0) - \tau_{10})^{m_1}} K_t^{(2)},$$

$$h'_2 = \frac{\Phi_2(\tau)}{\Phi_1(\tau)} = \frac{B_2 \tau_{20}^{m_2} (\tau(0) - \tau_{10})^{m_1}}{B_1 \tau_{10}^{m_1} (\tau(0) - \tau_{20})^{m_2}} K_t^{(1)}; \quad \tau(0) = fp(\alpha_2, \delta).$$

W wyniku całkowania układu (1) z uwzględnieniem zależności (2), (4), (8), (9), (14), (15) otrzymano wyraz na obliczenie trwałości łożyska, gdy wał ma przekrój kołowy:

$$t = \frac{-B_k \tau_{k0}^{m_k}}{v S_h \Sigma_k (1 - m_k) K_t^{(k)}} \left\{ [\tau(0) - \tau_{k0}]^{1-m_k} - [(\tau(0) - \tau_{k0}) + h_k \Sigma_k S_h]^{1-m_k} \right\} \quad (19)$$

gdzie: $S_h = fp(\alpha_2, h) / \varepsilon_h$; $\Sigma_1 = (-K_t^{(1)} + h'_1)$, $\Sigma_2 = (K_t^{(2)} - h'_2)$; $K_t^{(1)} = 1$, $K_t^{(2)} = \alpha_{0\delta} / \pi$.

Stąd po przekształceniu:

$$h_k = \left| \frac{1}{S_h \Sigma_k} \left[\sqrt[1-m_k]{\frac{L_k H_k^{1-m_k} - t_*}{L_k}} - H_k \right] \right|, \quad (20)$$

gdzie: $L_k = B_k \tau_{k0}^{m_k} / v S_h (1 - m_k) \Sigma_k K_t^{(k)}$, $H_k = \tau(0) - \tau_{k0}$.

Przedstawiony model uogólniony został wykorzystany do badania trwałości oraz zużycia łożyska z wałem o przekroju kołowym a tuleją z owalnością zarysu, gdy występuje styk jednoobszarowy. W następstwie zastosowano podany model jako podstawę do podbudowania modelu kumulacyjnego, gdzie przekrój wału posiada niekołowość konturu.

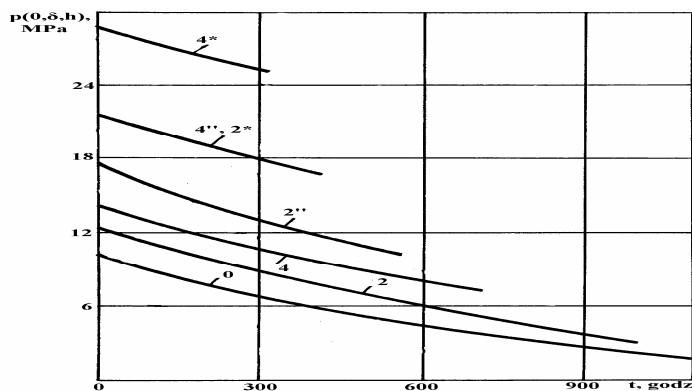
3. Numeryczne rozwiązanie zagadnienia

W celu oszacowania parametrów stykowych ($p(0, \delta)$, $\alpha_{0\delta}$, $p(0, \delta, h)$, $\alpha_{0\delta h}$) oraz tribologicznych (t ; $h_1(0)$, $h_2(0)$) zostało przeprowadzone rozwiązanie numeryczne wskazaną metodą przy następujących danych wyjściowych: $N = 0,01$; $0,1$; 1 MN ; $R = 0,1$; $0,05$; $0,025 \text{ m}$; $v = 0,1 \text{ m/sek}$; $f = 0,05$; $\varepsilon = (2; 4) \cdot 10^{-4} \text{ m}$, $\delta_2 = 0$, $\delta_1 = (0, 2, 4) \cdot 10^{-4} \text{ m}$, $\delta_1 \leq \varepsilon$, $K_t^{(2)} = \alpha_{0\delta} / \pi$, $K_t^{(1)} = 1$; $h_{1*} = (1, 2, 3, 4) \cdot 10^{-4} \text{ m}$ (dla (19)), $t_* = 3,6 \cdot 10^4$, $3,6 \cdot 10^5$, $1,8 \cdot 10^6 \text{ sek.}$ (dla (20)); $E_1 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, $\mu_1 =$

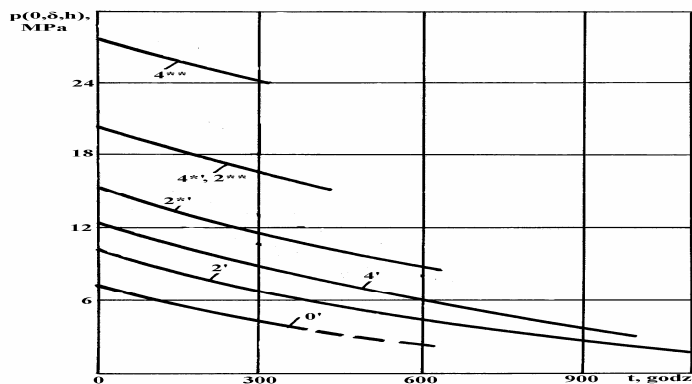
0,34 (brąz); $E_2 = 2,1 \cdot 10^5$ MPa, $\mu_2 = 0,3$ (stal hartowana); $B_1 = 1,9 \cdot 10^9$, $m_1 = 0,76$; $\tau_{10} = 0,1$ MPa; $B_2 = 4,9 \cdot 10^9$, $m_2 = 0,65$, $\tau_{20} = \tau_{10}$; $\varepsilon_h = -h_1 \Sigma_1$, $\Sigma_1 = (1 - h'_1)$.

Charakterystyki graniastości konturu otworu tulei 1 będą: a) kołowy 1 – kołowy 2: $D_1 = 1$, $D_2 = 1$; b) owalny 1 – kołowy 2: $D_1(\alpha) = 1 - 3\cos 2\alpha$, $D_2 = 1$; c) trójkątny 1 – kołowy 2: $D_1(\alpha) = 1 - 8\cos 3\alpha$, $D_2 = 1$; d) czworokątny 1 – kołowy 2: $D_1(\alpha) = 1 - 15\cos 4\alpha$, $D_2 = 1$.

Wyniki podano dla wskazanych typów graniastości przy $N = 0.1$ MN w postaci graficznej na rys. 2 – 6.



a)



b)

Rys. 2. Zmiana nacisków wskutek zużycia dla różnych typów graniastości konturu tulei:

(rys. a) $\varepsilon = 0.4$ mm - kołowy: 0 – $\delta_1 = 0$; owalny: 2 – $\delta_1 = 0.2$ mm, 4 – $\delta_1 = 0.4$ mm;

trójkątny: 2'' – $\delta_1 = 0.2$ mm, 4'' – $\delta_1 = 0.4$ mm; czworokątny: 0 – $\delta_1 = 0$,

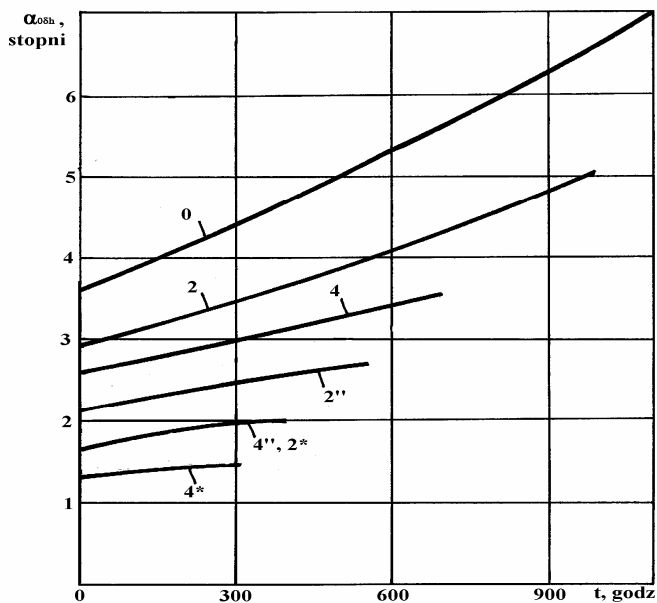
2* – $\delta_1 = 0.2$ mm, 4* – $\delta_1 = 0.4$ mm;

(rys. b) $\varepsilon = 0.2$ mm - kołowy: 0' – $\delta_1 = 0$; owalny: 2' – $\delta_1 = 0.2$ mm, 4' – $\delta_1 = 0.4$ mm;

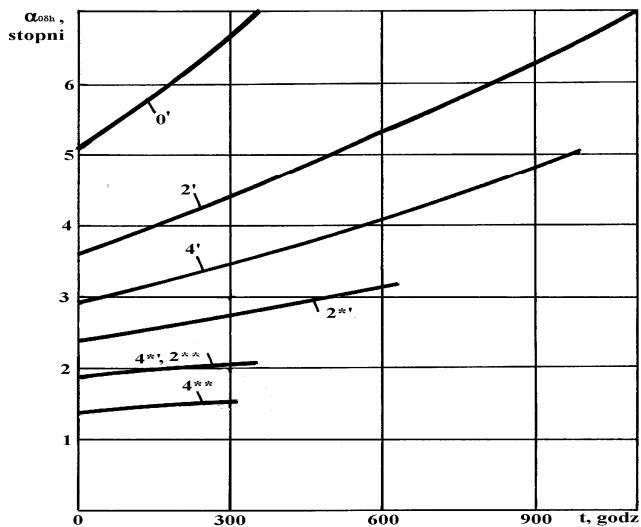
trójkątny: 2*' – $\delta_1 = 0.2$ mm, 4*' – $\delta_1 = 0.4$ mm; czworokątny: 0' – $\delta_1 = 0$,

2** – $\delta_1 = 0.2$ mm, 4** – $\delta_1 = 0.4$ mm

Zmniejszenie luzu promieniowego ε powoduje zmniejszenie nacisków wstępnych maksymalnych $p(0,\delta)$ oraz wskazana prawidłowość zachowuje się dla nacisków $p(0,\delta,h)$ w procesie zużywania się elementów łożyska.



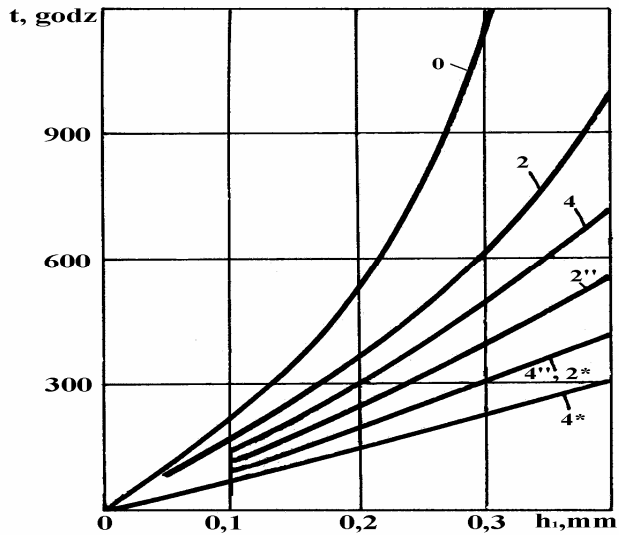
a)



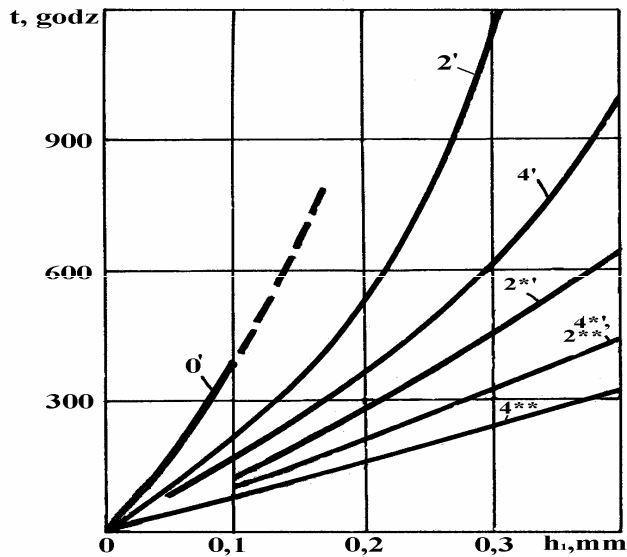
b)

Rys. 3. Zmiana półkąątów styku ribologicznego α_{0sh} przy zużyciu

Należy podkreślić, że zmniejszenie promienia R_1 czopa wału o dwa razy powoduje dwukrotne zwiększenie $p(0,\delta)$ oraz $p(0,\delta,h)$, a kąty $\alpha_{0\delta}$ oraz $\alpha_{0\delta h}$ nie ulegają przy tym zmianie. Trwałość t przy dwukrotnym zmniejszeniu promienia R_1 ulega zmniejszeniu 1.8 – 2 razy.



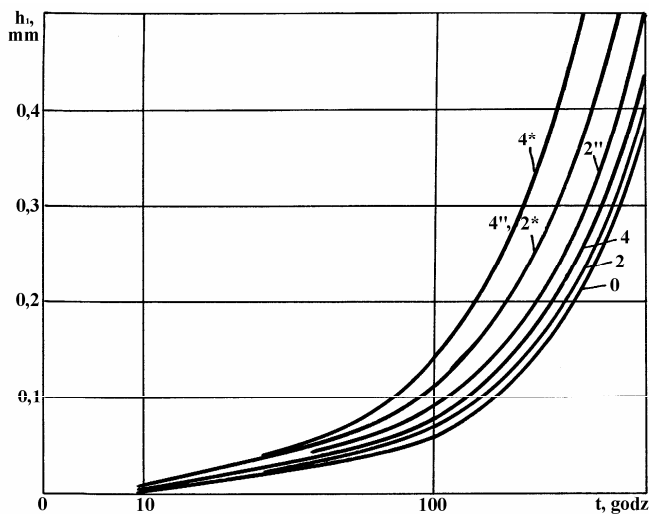
a)



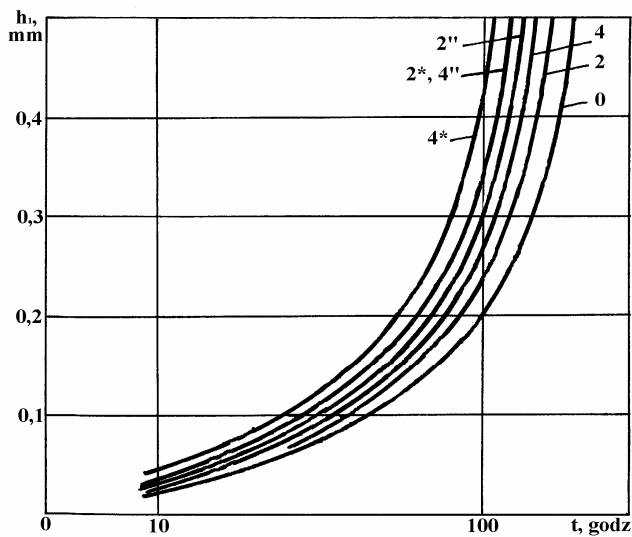
b)

Rys. 4. Wpływ graniastości oraz luzu promieniowego na trwałość łożyska przy zużyciu

Analiza rys. 4 wykazuje, że graniastość tulei w znacznym stopniu (nawet kilkakrotnie) obniża trwałość t łożyska przy tych samych wartościach zużycia liniowego h_1 w porównaniu ze schematem najprostszym koło – koło (krzywa 0).



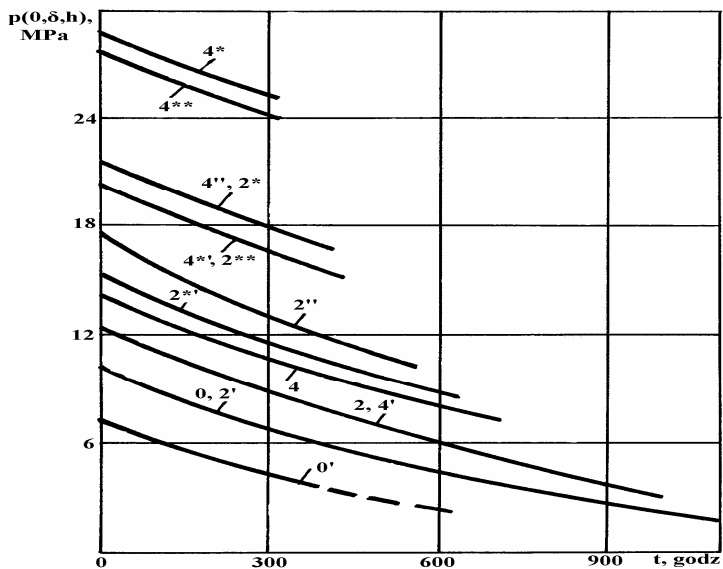
a)



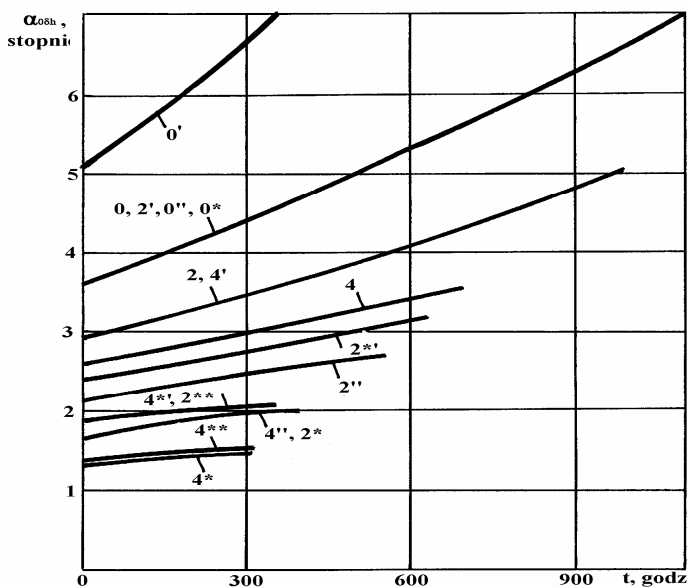
b)

Rys. 5. Zależność zużycia tulei łożyska od czasu z uwzględnieniem graniastoci oraz promienia czopa wału: a - $R_1 = 0.1$ m; b - $R_1 = 0.025$ m; $\varepsilon = 0.4$ mm

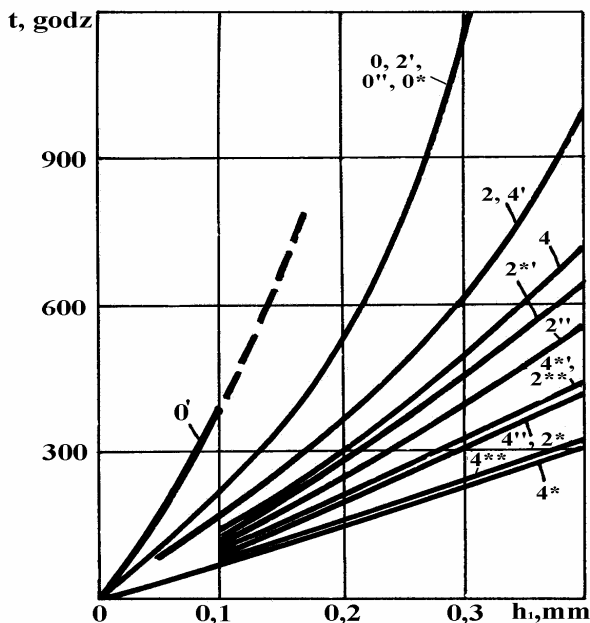
Dla przypadku obciążenia $N = 1$ MN oraz $\varepsilon = 0.4$ mm zależności graficzne podane są na rys. 6 – 8.



Rys. 6. Zmiana nacisków stykowych maksymalnych wskutek zużycia



Rys. 7. Zmiana półkątów styku tribologicznego przy zużyciu



Rys. 8. Wpływ graniastości oraz luzu promieniowego na trwałość łożyska przy zużyciu

Wyniki badań potwierdzają wcześniejsze założenia o wpływie jakościowym oraz ilościowym małej niekołowości na parametry styku początkowego – $p(0, \delta)$, $\alpha_{0\delta}$; styku tribologicznego (przy zużywaniu się) – $p(0, \delta, h)$, $\alpha_{0\delta h}$; charakterystyk tribologicznych – t , h_1 oraz h_2 .

LITERATURA

1. Andrejkiv A.E., Czerniec M.V. Ocenka kontaktного взаимодействия трущихся деталей машин. Naukova dumka, Kijev, 1991.
2. Goriaczewa I.G., Dobyczin N.M. Kontaktnyje zadachi v tribologii. Maszynostrojenije, Moskva, 1988.
3. Kovalenko E.V. K rasczetu iznashivaniya sprjazhenija val – vtulka. Mechanika Tverdogo Tela, № 6, 1982, str. 66–72.
4. Kuźmenko A.G. Metody rozrachunkiv na znosuvannja ta nadijnist. TUP, Chmelnyckyj, 2002.
5. Teplýj M.I. Opredielienije kontaktnych parametrov i iznosa v cilindriczeskich oporach skolženija. Trenije i Iznos, № 6, 1987, str. 895–902.
6. Czerniec M.V. K voprosu ob ocenke dołgoviecznosti cilindriczeskich tribosistem skolženija s granicami blizkimi k krugovym. Trienije i Iznos, № 3, 1996, str. 340–344.
7. Czerniec M., Pasieczko M., Nęczas A. Metody prognozuvannia ta pidvyszczennia znosostijkosti trybotechnicznych system kovzannia. U 3-ch tomach. Tom 1. Doslidžennia ta rozrachunok trybosystem kovzannia, metody pidvyszczennia dovgovicznosti i znosostijkosti. Koło, Drogożyć, 2001.
8. Czerniec M.V. Metodologija ocinky charakterystyk kontaktu ta prognozuvannia dovgovicznosti cylindrycznych trybosystem kovzannia. Problemy Trybologii, № 1, 2000, str. 14–22.
9. Chernets M.V. A Contact Problem for a Cylindrical joint with Technological Faceting of the Contours of its Parts. Materials Science, №6, 2009, pp. 859–868.

10. Czerniec M. Wytrzymałość stykowo-tarciowa oraz trwałość tribotechnicznych systemów ślizgowych. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2000.
11. Czerniec M. Zagadnienia stykowe dla układów cylindrycznych z małą graniastością konturów przy zuzyciu. Wyd. Państwowego Uniwersytetu Pedagogicznego im. I. Franki, Drohobycz, 2009.

WEAR SIMULATION OF THE SLIDING BEARING WITH NON-CIRCULARITY OF CONTOURS. PART 1. THE GENERALIZED LINEAR WEAR MODEL

Abstract

The contact problem for sliding bearing with non-circularity of shaft and hob, taking into account their wear, has been presented. The generalized linear mathematical wear model of such tribological system for cases of single-area and mixed (single-double-single-area) interaction has been given. As the result of numerical solution the regularities of influence fo non-circularity of hob on contact preasures, longevity and wear were established.

Keywords: sliding bearing, shaft and hob non-circularity, mathematical wear model, single-area and mixed contact, contact pressures, longevity, wear

SYMULACJA ZUŻYWANIA ŁOŻYSKA ŚLIZGOWEGO Z NIEKOŁOWOŚCIĄ KONTURÓW. CZ. 1. UOGÓLNIONY MODEL LINIOWY ZUŻYWANIA

Streszczenie

Przedstawiono zagadnienie kontaktowe dla łożyska ślizgowego ze wstępną niekołowością tulei i wału z uwzględnieniem ich zużycia. Podano uogólniony liniowy model matematyczny zużycia takiego układu tribologicznego dla przypadków jednoobszarowego oraz mieszanego (jedno-dwu-jednoobszarowego) współdziałania. W wyniku rozwiązania numerycznego ustalono prawidłowości wpływu niekołowosci tulei na naciski stykowe, trwałość oraz zużycie.

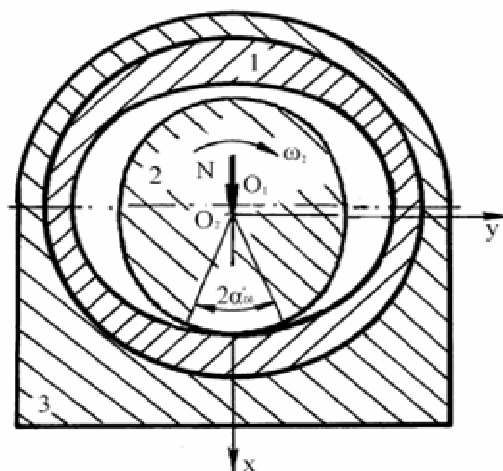
Słowa kluczowe: łożysko ślizgowe, niekołowość tulei oraz wału, model matematyczny zużycia, styk jednoobszarowy oraz mieszany, naciski stykowe, trwałość, zużycie

Prof. dr hab. inż. Miron CZERNIEC
Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych
Politechnika Lubelska

Mgr Wołodymyr ŻYDYK
Mgr Jurij Czerniec
Państwowy Uniwersytet Pedagogiczny w Drohobczu
82100 Drohobycz ul. Iwana Franki 24
tel./fax.: (03803244) 38111
e-mail: kic@drohobych.net

SYMULACJA ZUŻYWANIA ŁOŻYSKA ŚLIZGOWEGO Z NIEKOŁOWOŚCIĄ KONTURÓW. CZĘŚĆ 2. UOGÓLNIONY MODEL KUMULACYJNY ZUŻYWANIA

Przedstawiony wyżej (część 1) uogólniony model liniowy zużycia [1, 2, 4] nie może być bezpośrednio wykorzystany do badania kinetyki zużycia łożyska z odchyłkami zarysów wału oraz tulei od kołowości (rys.1).



Rys. 1. Schemat łożyska z owalnością elementów

Odchyłka zarysu wału od kołowości powoduje, że wstępne parametry kontaktu (maksymalne naciski stykowe $p(\alpha_2, \delta)$, półkąąt kontaktu $\alpha_{0\delta} = \alpha_{0\delta}(\alpha_2)$ oraz kontaktu tribologicznego ($p(\alpha_2, \delta, h)$, $\alpha_{0\delta h}$), a także zużycie liniowe wału i tulei będą funkcjami jego kąta obrotu α_2 . W tym celu stosuje się opracowany kumulacyjny model zużycia [3, 5], gdzie wprowadzono interwałowo – dyskretny schemat współdziałania elementów łożyska na wybranym interwale $\Delta\alpha_2$ kontaktu tribologicznego.

1. Model kumulacyjny zużywania

Odpowiednio zużycia $\bar{h}_{1\alpha_2}$ i $\bar{h}_{2\alpha_2}$ elementów łożyska na interwale $\Delta\alpha_2$ kontaktu tribologicznego obliczają się według wyrazu

$$\bar{h}_{k\alpha_2} = \left| \frac{1}{S_h \Sigma_k} \left[\sqrt[1-m_k]{\frac{L_k H_{k\alpha_2}^{1-m_k} - t_*''}{L_k}} - H_{k\alpha_2} \right] \right| \quad (21)$$

gdzie: $H_{k\alpha_2} = \tau_0(\alpha_2) - \tau_{k0}$ – w pierwszym obrocie wału,

$H_{k\alpha_2} = \tau_0(\alpha_2, n_2) - \tau_{k0}$ – w następnych n_2 jego obrotach;

$\tau_0(\alpha_2) = fp(\alpha_2, \delta)$;

$\tau_0(\alpha_2, n_2) = fp(\alpha_2, n_2, \delta, h)$;

$K_t^{(1)} = K_t^{(2)} = 1$.

Czas t_*'' współdziałania tribologicznego na przemieszczeniu kątowym $\Delta\alpha_2$ będzie:

$$t_*'' = \frac{L'}{v} \Delta\alpha_2 = \frac{\Delta\alpha_2}{360\bar{n}_2} \quad (22)$$

gdzie: $L' = 2\pi R_2 / 360$ – droga tarcia przy obrocie wału na 1° ,

$v = \omega_2 R_2$ – prędkość poślizgu,

$\omega_2 = \pi \bar{n}_2 / 30$,

n_2 – liczba obrotów wału na minutę.

Przy wyznaczeniu kątów $\alpha_{0\delta h}$ według (17) oraz $\gamma_{k\delta h}$ według (18) należy przyjąć:

$$\varepsilon_h = \sum_1^j \bar{h}_{1\alpha_2} \Sigma_1 \quad (23)$$

gdzie: liczba interwałów dyskretyzacji j konturu wału (interwałów współdziałania) w jednym jego obrocie $j = 360^\circ / \Delta\alpha_2$.

Natomiast we wzorach (15, 16) należy przyjąć $\varepsilon_h \equiv \varepsilon'_h = \bar{h}_{1\alpha_2} \Sigma_1$. Naciski stykowe tribologiczne na każdym interwale j w 1-wszym obrocie wału przy jego zużyciu ustala się następująco:

$$p(\alpha_2, \delta, h) = p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^j p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}) \quad (24)$$

gdzie: $p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta)$ oraz $p(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_j)$ określają się na każdym j interwale według (8), (9) i (15, 16).

We wszystkich następnych obrotach wału naciski stykowe tribologiczne określa się zgodnie z wyrazem:

$$p(\alpha_2, n_2, \delta, h) = p(2\pi n_2 + \alpha_2, \delta, h) = p[2\pi n_2 + (\alpha_2 - \Delta\alpha_2), \delta, h] + \sum_1^{jn_2} p[2\pi n_2 + (\alpha_2 - \Delta\alpha_2), \bar{h}_{j-1}] \quad (25)$$

Zużycie tulei oraz wału łożyska w ciągu jednego obrotu ustala się według wzorów:

$$h_1^{(1)} = \sum_1^j \bar{h}_{1|_{\alpha_1=0}}^{(1)} \quad (\text{w punkcie } \alpha = 0) \quad (26)$$

$$h_{2\alpha_2}^{(1)} = \bar{h}_{2\alpha_2}^{(1)} \quad (\text{w punktach } \alpha_2 = 0, \Delta\alpha_2, 2\Delta\alpha_2, \dots, 360^\circ) \quad (27)$$

Odpowiednio po n_2 obrotach wału zużycie elementów będzie:

$$h_1^{(n_2)} = \sum_1^{jn_2} \bar{h}_{1|_{\alpha_1=0}}^{(n_2)} \quad (28)$$

$$h_{2\alpha_2}^{(n_2)} = \sum_1^{n_2} \bar{h}_{2\alpha_2}^{(n_2)} \quad (29)$$

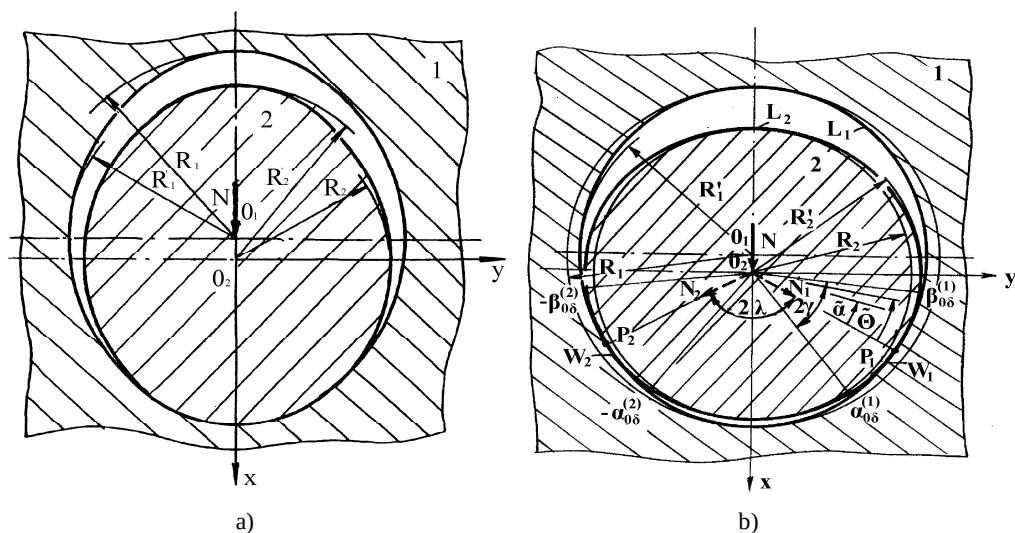
Czas pracy T łożyska:

$$T = j t_*'' n_2 \text{ (sek).} \quad (30)$$

Wyniki rozwiązania zagadnienia o badaniu kinetyki zużycia łożyska z owalnością tulei i wału według podanego modelu w przypadku wystąpienia styku jednoobszarowego przedstawiono w pracach [6, 7].

2. Uogólniony model kumulacyjny zużycia

Badanie bardziej złożonego przypadku styku mieszanego (jedno-dwu-jednoobszarowego) w łożysku ślizgowym z owalnością tulei i wału jest możliwe według uogólnionego modelu kumulacyjnego. Poniżej przedstawiono częściowy przypadek dla łożyska z owalnością wału oraz tuleją o zarysie kołowym. Dla takiego łożyska, schemat którego przedstawiono na rys. 2, w zależności od wartości parametrów ε oraz δ_2 wystąpi styk jednoobszarowy lub mieszany (jedno-dwu-jednoobszarowy).



Rys.2. Schemat łożyska ślizgowego z owalnością konturów

W przypadku styku mieszanego będzie pięć faz współdziałania wału i tulei: trzy w styku jednoobszarowym, dwie w styku dwuobszarowym.

Ogólny warunek przejścia od styku jednoobszarowego do styku dwuobszarowego przez określenie odpowiednich kątów obrotu α_2 ma postać

$$\Sigma_\delta = 1 - (\delta_2 / 2\varepsilon) D_2(\alpha_2) = 0 \quad (31)$$

gdzie: $D_2 = 1 - 3\cos 2\alpha_2$ – charakterystyka owalności wału.

Niżej przedstawiono metodykę badania współdziałania stykowo-tribologicznego elementów łożyska w każdej z poszczególnych faz (rys. 3) styku mieszanego oraz efektów tego współdziałania.

Faza I (p , P_1 – symetryczny i niesymetryczny styk jednoobszarowy)

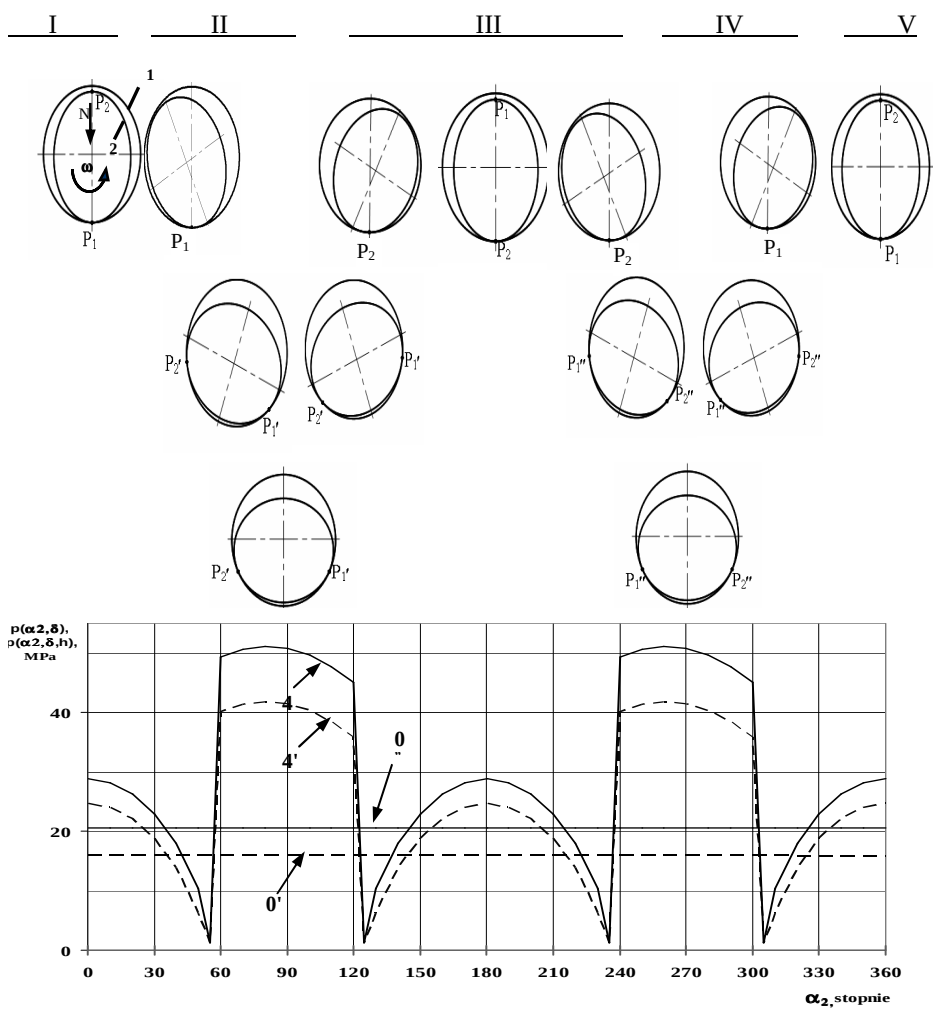
- $\alpha_2^{(I)} = 0, \Delta\alpha_2, \dots, \alpha_{2**1}^{(I)}$, $\alpha_{2**1}^{(I)}$ z warunku $\Sigma_\delta^{(I)} = 0$;
- półkąty kontaktu $\alpha_{0\delta}(\alpha_2)$ wg (10) oraz kontaktu tribologicznego $\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)$ wg (17); wskazane wzory podano wcześniej w części I;
- maksymalne naciski stykowe tribologiczne :

$$\text{pierwszy obrót: } p_{11}(\alpha_2, \delta, h) = p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^j p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}),$$

$$\begin{aligned} n_2 \text{ obrotów: } p_{11}(\alpha_2, n_2, \delta, h) &= p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^{jn_2} p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \\ &+ \sum_1^{jn_2} p_{23}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{15}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}). \end{aligned}$$

Odpowiednio indeksy obok p określają: 1-y – punkt styku, 2-i – fazę kontaktu.

- wał 2 zużywa się po konturze w obszarze $\alpha_2^{(I)}$, a tuleja 1 maksymalnie, gdy $\alpha = \alpha_1 = 0$;
- ich zużycie liniowe ustala się w pierwszym obrocie wg (26), (27) oraz po n_2 obrotach wg (28), (29) ; wskazane wzory podano wcześniej w części II;
- dla $\alpha_{2**1}^{(I)}$ $p_{\min} = 0,6N / R$.



Rys. 2 . Fazy styku mieszanego oraz maksymalne naciski stykowe : linie ciągłe - naciski wstępne, linie kreskowe – naciski po zużyciu dopuszczalnym tulei $h_{1*} = 0,3$ mm; 0, 0' -

$$\delta_1 = \delta_2 = 0; \quad 4, 4' - \delta_1 = 0, \quad \delta_2 = 0,4 \text{ mm}$$

Faza II_1 (p . P'_1 – niesymetryczny i symetryczny styk dwuobszarowy)

- $\alpha_2^{(II)} = \alpha_{2*1}^{(II)}, \dots, 90^\circ, \dots, \alpha_{2**1}^{(II)}$, $\alpha_{2*1}^{(II)} = \alpha_{2**1}^{(I)}$, $\alpha_{2**1}^{(II)}$ z warunku $\Sigma_\delta^{(II)} = 0$;
- półkąty kontaktu $\gamma_1(\alpha_2)$ wg (12), gdzie $N_{1\alpha_2}$ wg (13), oraz kontaktu tribologicznego $\gamma_{1\delta h}(\alpha_2)$ wg (18);
- maksymalne naciski stykowe tribologiczne:

$$\text{pierwszy obrót: } p_{12}(\alpha_2, \delta, h) = p_{12}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^j p_{12}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}),$$

$$n_2 \text{ obrotów: } p_{12}(\alpha_2, n_2, \delta, h) = p_{12}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \\ + \sum_1^{jn_2} p_{12}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{24}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}),$$

- wał 2 zużywa się maksymalnie w punkcie P'_1 , gdzie kąt współdziałania $\lambda_1 = \arcsin[\alpha_2 - (90^\circ - \lambda)]$; tuleja 1 zużywa się w strefie $\alpha_2^{(II)}$;
 $D_2 = 1 + 3\cos 2\alpha$; $\alpha = \lambda$;
- ich zużycie liniowe ustala się następująco:

$$\text{pierwszy obrót: } h_{1\alpha}^{(1)} = \bar{h}_{1\alpha}^{(1)}, h_{2\alpha}^{(1)} = \sum_1^j \bar{h}_{2\alpha}^{(1)},$$

$$n_2 \text{ obrotów: } h_{1\alpha}^{(n_2)} = \sum_1^{n_2} \bar{h}_{1\alpha}^{(n_2)}, h_{2\alpha}^{(n_2)} = \sum_1^{jn_2} \bar{h}_{2\alpha}^{(n_2)};$$

- dla $\alpha_{2*1}^{(II)}$ oraz $\alpha_{2**1}^{(II)}$ $p_{\min} = 0,6N / R$.

Faza II_2 (p . P'_2 – niesymetryczny i symetryczny styk dwuobszarowy)

- $\alpha_2^{(II)} = \alpha_{2*2}^{(II)}, \dots, 90^\circ, \dots, \alpha_{2**2}^{(II)}$, $\alpha_{2*2}^{(II)} = \alpha_{2*1}^{(II)} - 2\lambda$, $\alpha_{2**2}^{(II)} = \alpha_{2**1}^{(II)} - 2\lambda$;
- półkąty kontaktu $\gamma_2(\alpha_2)$ wg (12), gdzie $N_{2\alpha_2}$ wg (13), oraz kontaktu tribologicznego $\gamma_{2\delta h}(\alpha_2)$ wg (18);
- maksymalne naciski stykowe tribologiczne :

$$\text{pierwszy obrót: } p_{22}(\alpha_2, \delta, h) = p_{22}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \sum_1^j p_{22}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}),$$

$$n_2 \text{ obrotów: } p_{22}(\alpha_2, n_2, \delta, h) = p_{22}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \\ + \sum_1^{jn_2} p_{22}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{14}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1});$$

- wał 2 zużywa się maksymalnie w punkcie P'_2 , gdzie kąt współdziałania $\lambda_2 = \arcsin[\alpha_2 - (90^\circ + \lambda)]$; tuleja 1 zużywa się w strefie $\alpha_2^{(II)}$; $D_2 = 1 + 3 \cos 2\alpha$; $\alpha = -\lambda$;
- ich zużycie liniowe ustala się jak poprzednio w fazie II₁;
- dla $\alpha_{2*2}^{(II)}$ oraz $\alpha_{2**2}^{(II)}$ $p_{\min} = 0,6N / R$.

Faza III (p. P_2 – symetryczny i niesymetryczny styk jednoobszarowy)

- $\alpha_2^{(III)} = \alpha_{2*2}^{(III)}, \dots, 180^\circ, \dots, \alpha_{2**2}^{(III)}$, $\alpha_{2*2}^{(III)} = \alpha_{2**1}^{(II)}$, $\alpha_{2**2}^{(III)}$ z warunku $\Sigma_\delta^{(III)} = 0$;
- półkąty kontaktu $\alpha_{0\delta}(\alpha_2)$ oraz kontaktu tribologicznego $\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)$ jak w fazie I;
- maksymalne naciski stykowe tribologiczne :

$$\text{pierwszy obrót: } p_{23}(\alpha_2, \delta, h) = p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \\ + \sum_1^j p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}) + \sum_1^j p_{23}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}),$$

$$n_2 \text{ obrotów: } p_{23}(\alpha_2, n_2, \delta, h) = p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) +$$

$$+ \sum_1^{jn_2} p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{23}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{15}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1});$$

- wał 2 zużywa się po konturze w obszarze $\alpha_2^{(III)}$, a tuleja 1 maksymalnie, gdy $\alpha = \alpha_1 = 0$;
- zużycia liniowe elementów łożyska ustala się wg (26) – (29).

Faza IV_2 (p, P_2'' – niesymetryczny i symetryczny styk dwuobszarowy)

- $\alpha_2^{(IV)} = \alpha_{2*2}^{(IV)}, \dots, 270^\circ, \dots, \alpha_{2**2}^{(IV)}, \quad \alpha_{2*2}^{(IV)} = \alpha_{2*2}^{(III)}, \alpha_{2**2}^{(IV)}$ z warunku $\Sigma_{\delta}^{(IV)} = 0$;
- półkąty kontaktu $\gamma_2(\alpha_2)$ wg (12), gdzie $N_{2\alpha_2}$ wg (13), oraz kontaktu tribologicznego $\gamma_{2\delta h}(\alpha_2)$ wg (18);
- maksymalne naciski stykowe tribologiczne :

$$\text{pierwszy obrót: } p_{24}(\alpha_2, \delta, h) = p_{12}(\alpha_2, \delta, h) + \sum_1^j p_{24}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}),$$

$$n_2 \text{ obrotów: } p_{24}(\alpha_2, n_2, \delta, h) = p_{12}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \\ + \sum_1^{jn_2} p_{12}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{24}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1});$$

- wał 2 zużywa się maksymalnie w punkcie P_2'' , gdy $\alpha = \lambda$; tuleja 1 zużywa się w strefie $\alpha_2^{(IV)}$;
- ich zużycie liniowe ustala się następująco:

$$\text{pierwszy obrót: } h_{1\alpha}^{(1)} = \bar{h}_{1\alpha}^{(1)}, h_{2\alpha}^{(1)} = \sum_1^j \bar{h}_{2\alpha}^{(1)},$$

$$n_2 \text{ obrotów: } h_{1\alpha}^{(n_2)} = \sum_1^{n_2} \bar{h}_{1\alpha}^{(n_2)}, h_{2\alpha}^{(n_2)} = \sum_1^{jn_2} \bar{h}_{2\alpha}^{(n_2)};$$

- dla $\alpha_{2*2}^{(IV)}$ oraz $\alpha_{2**2}^{(IV)}$ $p_{\min} = 0,6N / R$.

Faza IV_1 (p, P_1'' – niesymetryczny i symetryczny styk dwuobszarowy)

- $\alpha_2^{(IV)} = \alpha_{2*1}^{(IV)}, \dots, 270^\circ, \dots, \alpha_{2**1}^{(IV)}, \quad \alpha_{2*1}^{(IV)} = \alpha_{2*2}^{(IV)} - 2\lambda, \alpha_{2**1}^{(IV)}$ z warunku $\Sigma_{\delta}^{(IV)} = 0$;
- półkąty kontaktu $\gamma_1(\alpha_2)$ wg (12), gdzie $N_{1\alpha_2}$ wg (13), oraz kontaktu tribologicznego $\gamma_{1\delta h}(\alpha_2)$ wg (18);
- maksymalne naciski stykowe tribologiczne :

$$\text{pierwszy obrót: } p_{14}(\alpha_2, \delta, h) = p_{22}(\alpha_2, \delta, h) + \sum_1^j p_{14}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}),$$

$$n_2 \text{ obrotów: } p_{14}(\alpha_2, n_2, \delta, h) = p_{22}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \\ + \sum_1^{jn_2} p_{22}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{14}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1});$$

- wał 2 zużywa się maksymalnie w punkcie P_2'' , gdy $\alpha = -\lambda$; tuleja 1 zużywa się w strefie $\alpha_2^{(IV)}$;
- ich zużycie liniowe ustala się jak poprzednio w fazie IV₂.

Faza V (p. P_1 – symetryczny i niesymetryczny styk jednoobszarowy)

- $\alpha_2^{(V)} = \alpha_{2*1}^{(V)}, \dots, 360^\circ$, $\alpha_{2*1}^{(V)} = \alpha_{2**1}^{(IV)}$ lub z warunku $\Sigma_\delta^{(V)} = 0$;
- półkąty kontaktu $\alpha_{0\delta}(\alpha_2)$ wg (10) i kontaktu tribologicznego $\alpha_{0\delta h}(\alpha_2)$ wg (17);
- maksymalne naciski stykowe tribologiczne :

$$\text{pierwszy obrót: } p_{15}(\alpha_2, \delta, h) = p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \\ + \sum_1^j p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}) + \sum_1^j p_{23}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}) + \sum_1^j p_{15}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \bar{h}_{j-1}), \\ n_2 \text{ obrotów: } p_{15}(\alpha_2, n_2, \delta, h) = p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, \delta) + \\ + \sum_1^{jn_2} p_{11}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{23}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1}) + \sum_1^{jn_2} p_{15}(\alpha_2 - \Delta\alpha_2, h_{j-1});$$

- wał 2 zużywa się po konturze w obszarze $\alpha_2^{(V)}$, a tuleja 1 maksymalnie, gdy $\alpha = \alpha_1 = 0$;
- zużycia liniowe elementów łożyska ustala się wg (26) – (29).
- dla $\alpha_{2*1}^{(V)}$ $p_{\min} = 0,6N / R$.

Summaryczne zużycie tulei i wału:

a) styk jednoobszarowy:

- tuleja:

$$h_{1|_{\alpha=0}}^{(n_2)} = h_1^{(I)} + h_1^{(III)} + h_1^{(V)} = \sum_j^{jn_2} \bar{h}_{1|_{\alpha=0}}^{(n_2)},$$

- wał:

$$h_{2a_2}^{(n_2)} = h_{2a_2}^{(I)}; h_{2a_2}^{(III)}; h_{2a_2}^{(V)} = \sum_1^{n_2} \bar{h}_{2a_2}^{(n_2)} - \text{po konturze odpowiednio w strefach } \alpha_2^{(I)}, \alpha_2^{(III)}, \alpha_2^{(V)}$$

b) styk dwuobszarowy:

- tuleja:

$$h_{1a}^{(n_2)} = h_1^{(II)} + h_1^{(IV)} \quad [p. P_1' (\text{strefa } \alpha_2^{(II)}) + p. P_2'' (\text{strefa } \alpha_2^{(IV)})],$$

$$h_{1a}^{(n_2)} = h_1^{(II)} + h_1^{(IV)} \quad [p. P_2' (\text{strefa } \alpha_2^{(II)}) + p. P_1'' (\text{strefa } \alpha_2^{(IV)})];$$

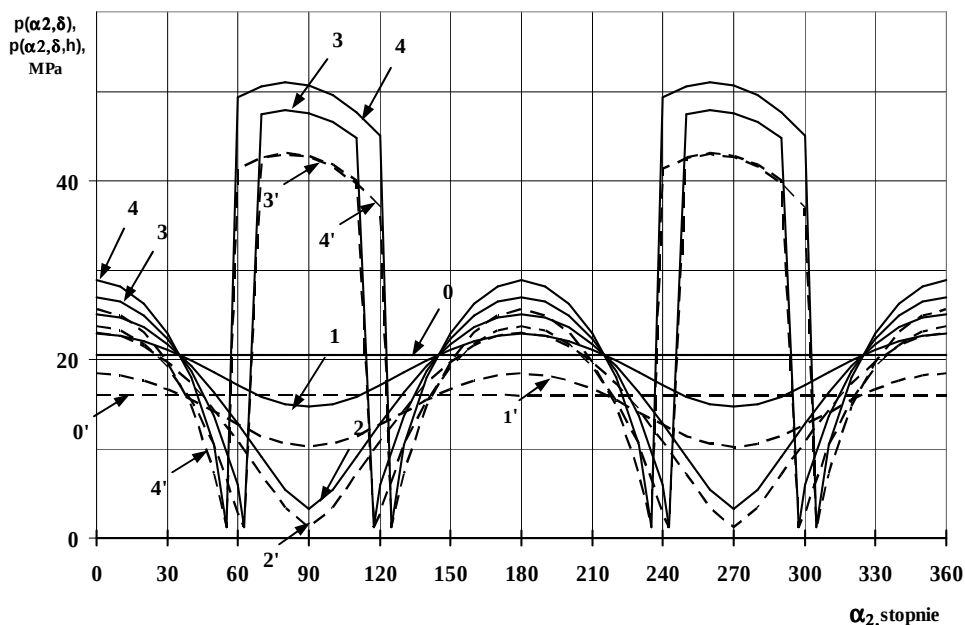
- wał:

$$h_{2a}^{(n_2)} = h_2^{(II)} + h_2^{(IV)} \quad [p. P_1'(\lambda_1) + p. P_2''(\lambda_2)],$$

$$h_{2a}^{(n_2)} = h_2^{(II)} + h_2^{(IV)} \quad [p. P_2'(-\lambda_2) + p. P_1''(-\lambda_1)].$$

Rozwiązanie zagadnienia przeprowadzono dla łożyska z owalnością wału przy następujących danych wyjściowych : $N = 0,1$ MN; $R = 0,05$ m; $v = 0,0628$ m/s; $f = 0,04$; $\varepsilon = 4,1 \cdot 10^{-4}$ m; $\delta_1 = 0$, $\delta_2 = (0; 1; 2; 3; 4) \cdot 10^{-4}$ m; $\delta_1 + \delta_2 \leq \varepsilon$, $\delta_2 \leq \delta_1$; $\Delta\alpha_2 = 15^\circ$; $\bar{n}_2 = 12$ obr/min; $h_{1*} = 0,3$ mm; $\Sigma_1 = -(1 - h_1')$, $E_1 = 1,1 \cdot 10^5$ MPa, $\mu_1 = 0,34$ (bronz CuSn5Zn5Pb5); $E_2 = 2,1 \cdot 10^5$ MPa, $\mu_2 = 0,3$ (stal 35, hartowanie + odpuszczanie); $B_1 = 4,75 \cdot 10^9$, $m_1 = 0,85$, $\tau_{10} = 0,1$ MPa; $B_2 = 5,46 \cdot 10^9$, $m_2 = 0,66$, $\tau_{20} = 0,08$ MPa.

Wyniki obliczeń podano na rys. 4 oraz 5. Na rys. 4 przedstawiono zmianę stykowych nacisków maksymalnych w przypadku styku jednoobszarowego (wykresy 0, 0'; 1, 1'; 2, 2') oraz w przypadku styku mieszanego (wykresy 3, 3'; 4, 4'). W styku tylko jednoobszarowym ($\delta_2 = 0$; 0,1; 0,2 mm) przy zwiększeniu owalności δ_2 wału naciski nieco zwiększają się jednak osiągają znacznie mniejszą wielkość jak w fazach styku mieszanego. Przy zmianie kąta obrotu wału naciski będą ulegały cyklicznej zmianie od max do min.



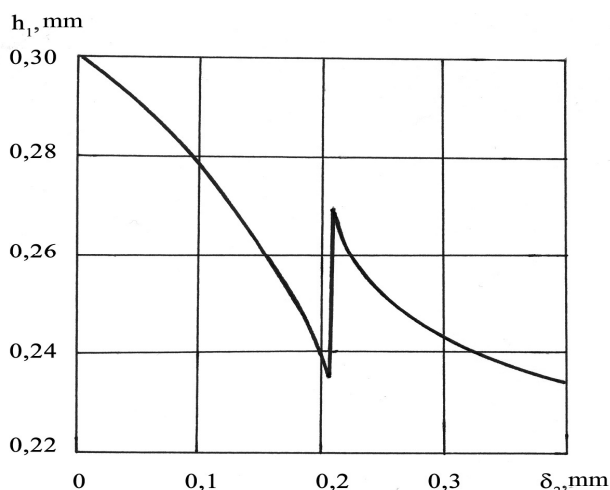
Rys.4. Zależność maksymalnych nacisków stykowych od usytuowania wału: 0, 0' - $\delta_1 = \delta_2 = 0$; 1, 1' - $\delta_2 = 0,1$ mm; 2, 2' - $\delta_2 = 0,2$ mm; 3, 3' - $\delta_2 = 0,3$ mm; 4, 4' - $\delta_2 = 0,4$ mm; linie ciągłe - naciski wstępne, linie kreskowe - naciski po zużyciu dopuszczalnym tulei

W styku mieszanym (jedno-dwu-jednoobszarowym) współdziałanie wału z tuleją jest bardziej złożone (rys. 3). Analiza wyników obliczeń świadczy, że w obszarze styku jednoobszarowego wzrost owalności wału powoduje zwiększenie nacisków $p(0, \delta)$, które jednak przy jego obracaniu się spadają do $p_{\min} = 0,6N / R_2$ zdecydowanie szybciej jak w omówionym wyżej pełnym styku jednoobszarowym. Dalej przy wystąpieniu styku dwuobszarowego naciski gwałtownie zwiększają się (rys. 4).

Analiza prawidłowości zmiany maksymalnych nacisków stykowych w wyniku zużycia (rys. 4) wskazuje, że przy $\delta_2 = 0$ oraz $\delta_2 = 0,1$ mm ona będzie największą (wykresy 0, 0'; 1, 1'). W przypadku owalności $\delta_2 = 0,2$ mm różnice pomiędzy naciskami $p(\alpha_2, \delta)$ i $p(\alpha_2, \delta, h)$ będą znacznie mniejsze (wykresy 2, 2'). Można to wyjaśnić tym, że w tym przypadku owalność wału jest zbliżona do jej wielkości granicznej $\delta_2 = 0,204$ mm, przy której styk jednoobszarowy zmienia się na styk dwuobszarowy. Zwiększenie owalności wału powoduje styk dwuobszarowy, w którym różnice pomiędzy naciskami wstępnymi a po zużyciu zwiększają się z jej wzrostem (wykresy 3, 3'; 4, 4').

Obrót wału z owalnością konturu powoduje spadek $p(\alpha_2, \delta)$, intensywność którego w znacznym stopniu zależy od wartości δ_2 (rys. 4). Naciski $p(\alpha_2, \delta)$ w przypadku wału z owalnością ($\delta_2 > 0$) w różnym stopniu przewyższają naciski $p(\alpha_2, 0)$ (wał o zarysie kołowym) tylko w 39,2% obrotu, natomiast w 60,8% obrotu one są mniejsze (rys. 4). Właśnie ta okoliczność powoduje zmniejszenie zużycia tulei przy zwiększeniu δ_2 .

Rysunek 5 wskazuje charakter zużycia h_1 tulei łożyska w przypadkach styku jednoobszarowego oraz mieszanego przy jednakowej liczbie obrotów wału z owalnością zarysu ($n_2 = 972000$ obr), dla których przy $\delta_1 = \delta_2 = 0$ osiąga się jej zużycie dopuszczalne 0,3 mm.



Rys. 4. Zużycie liniowe tulei łożyska w styku jednoobszarowym oraz dwuobszarowym

W fazie styku jednoobszarowego zwiększenie owalności wału powoduje spadek zużycia h_1 tulei. Zużycie h_2 wału po jego konturze w przypadku styku jednoobszarowego ($\delta_2 = 0 \dots 0,2$ mm) będzie o prawie dwa rzędy mniejsze jak tulei w punkcie $\alpha_2 = 0$.

Natomiast w fazie styku dwuobszarowego ($\delta_2 > 0,2$ mm) zużycie tulei występuje na pewnym obszarze jej zarysu i dla tego ono obniża się o rząd wielkości. Zużycie wału występuje we dwóch symetrycznych strefach kontaktu (schemat na rys. 3) co powoduje jego wzrost w 3, 4 razy większy jak tulei. Ustalono, że owalność wału okazuje korzystny wpływ na zmniejszenie zużycia tulei. Bez względu na rodzaj kontaktu (jednoobszarowy czy mieszany) trwałość łożyska wyznacza się trwałością tulei w strefie styku jednoobszarowego przy kątach obrotu wału $\alpha_2 = 0, 180^\circ, 360^\circ$.

LITERATURA

1. Andrejkiv A.E., Czerniec M.V. Ocenka kontaktного взаємодієствія трuszczихся діталей машин. Naukova Dumka, Kijev 1991.
2. Czerniec M.V. K voprosu ob ocenke dolgoviecznosti cilindriczieskich tribosistem skolzenija s granicami blizkimi k krugovym. Trienije i Iznos, № 3, 1996, str. 340–344.
3. Czerniec M.V., Liebidieva N.M. Ocinka kinetyky znoszuвання trybosystem kovzання pry najavnosti ovalnosti konturiv ich elementiv za kumulacijnoju modelu. Problemy Trybologii, № 4, 2005, str. 114–120.
4. Czerniec M. Wytrzymałość stykowo-tarciowa oraz trwałość tribotechnicznych systemów ślizgowych. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
5. Czerniec M. Zagadnienia stykowe dla układów cylindrycznych z małą graniastością konturów przy zużyciu. Wyd. Państwowego Uniwersytetu Pedagogicznego im. I. Franki, Drohobycz 2009.
6. Czerniec M., Andrejkiv O., Liebidieva N. Doslidžennia vplyvu składnogo ogranennia detalej pidszypnyka kovzання na parametry kontaktnoji ta trybokontaktnoji vzajemodii. Problemy Trybologii, № 4, 2007, str. 50–54.
7. Chernets M.V., Andrejkiv O.E., Liebidieva N.M., Zydyk V.B. A Model for the Evaluation of Wear and Durability of a Plain Bearing with Small Out-of-Roundness. Materials Science, №2, 2009, pp. 279–290.

WEAR SIMULATION OF THE SLIDING BEARING WITH NON-CIRCULARITY OF CONTOURS. PART 2. THE GENERALIZED CUMULATIVE WEAR MODEL

Abstract

The generalized cumulative wear model of sliding bearing for case of a) single-area interaction of shaft with ovality and hob with countours ovality; b) single-double-single-area interaction of shaft with ovality and hob with circular cross section has been presented. The regularities of shaft ovality influence on contact pressures change, linear wear and longevity of hob have been established.

Keywords: sliding bearing, shaft and busz ovality, generalized cumulative wear model, single-area contact, single-double-single-area contact, contact pressures, wear, longevity

SYMULACJA ZUŻYWANIA ŁOŻYSKA ŚLIZGOWEGO Z NIEKOŁOWOŚCIĄ KONTURÓW. CZ. 2. UOGÓLNIONY MODEL KUMULACYJNY ZUŻYWANIA

Streszczenie

Przedstawiono uogólniony model kumulacyjny zużycia łożyska ślizgowego dla przypadków: a) jednoobszarowego współdziałania wału s tulei z owalnością zarysów, b) jedno-dwu-jednoobszarowego współdziałania wału z owalnością i tulei o zarysie kołowym. Ustalono prawidłowości wpływu owalności wału na zmianę nacisków stykowych, zużycie liniowe oraz trwałość tulei.

Słowa kluczowe: łożysko ślizgowe, owalność wału i tulei, uogólniony model kumulacyjny zużywania, styk jedno oraz jedno-dwu-jednoobszarowy, naciski stykowe, zużycie, trwałość

Prof. dr hab. inż. Miron CZERNIEC
Instytut Technologicznych Systemów Informatycznych
Politechnika Lubelska

Mgr Wołodymyr ŻYDYK
Mgr Jurij Czerniec
Państwowy Uniwersytet Pedagogiczny w Drohobyczu
82100 Drohobycz ul. Iwana Franki 24
tel./fax.: (03803244) 38111
e-mail: kic@drohobych.net

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ADAPTACJI PIECA PEKAT 2 DO HARTOWANIA Z WYKORZYSTANIEM CIECZY POLIMEROWYCH

Wstęp

W piecach PEKAT 1.1 i PEKAT 2 według dokumentacji techniczno-ruchowej można prowadzić obróbkę cieplną w atmosferach regulowanych z wykorzystaniem czynnika chłodzącego – oleju hartowniczego stosowanego do obróbki cieplnej stali stopowych i węglowych. Natomiast na rynku istnieje coraz większe zapotrzebowanie na obróbkę stali konstrukcyjnych dodatkiem boru (B). Obróbka cieplna wyżej wymienionych materiałów wymaga nagrzewu i studzenia w cieczach o dużej intensywności chłodzenia (znacznie większej niż oleje hartownicze), jakimi są kąpiele polimerowe. Obróbka cieplna stali z zastosowaniem chłodziw polimerowych wymaga:

- nagrzewu w piecach,
- intensywnego chłodzenia w wannie hartowniczej usytuowanej na zewnątrz pieca.

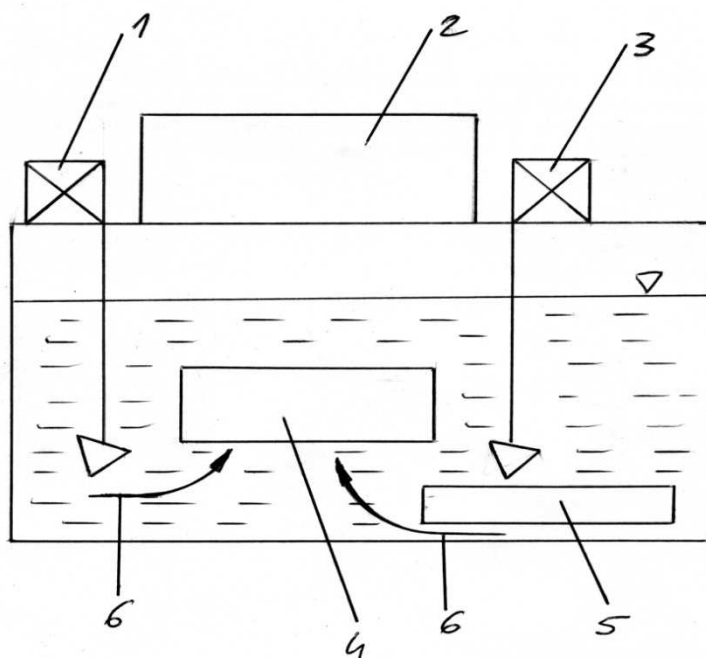
Piece PEKAT 1.1 i PEKAT 2 mają konstrukcję zintegrowaną z wanną przy równoczesnym zastosowaniu osłony atmosfery regulowanej. Taka konstrukcja pieca praktycznie wyklucza obróbką cieplną stali z chłodziwami polimerowymi bez koniecznych konstrukcyjnych modernizacji pieca.

1. Zastosowane narzędzia badawcze

- Analiza konstrukcji wanny chłodzącej pieca PEKAT 2,
- Analiza ruchu cieczy chłodzącej i jej intensywn. w czasie studzenia wsadu,
- Analiza ułożenie do nagrzewu i studzenia części do obróbki cieplnej,
- Przeprowadzenie prób obróbki cieplnej w różnych wersjach ułożenia wsadu i obiegu czynnika chłodniczego (roztwór POLIHARTENOLU E8) ze zmianami jego kierunku i intensywności przepływu

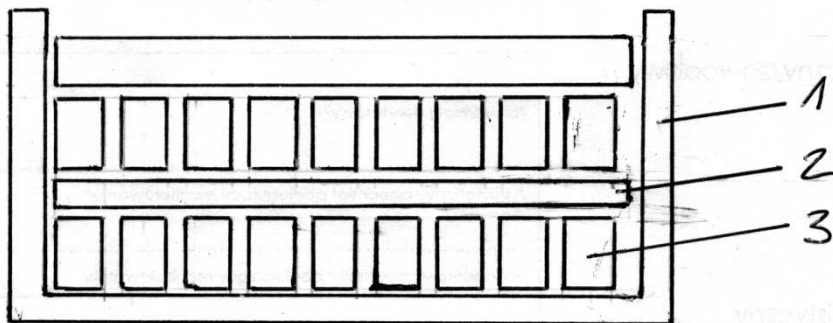
2. Prace modernizacyjne

- Analiza konstrukcji wanny chłodniczej pieca PEKAT 2,
- Opracowanie i zaproponowanie zmian konstrukcyjnych systemu ruchu kąpieli w wannie hartowniczej i komory grzejnej pieca,
- Przeprowadzenie prób obróbki cieplnej w różnych wersjach ułożenia wsadu i stężenia roztworu cieczy polimerowej POLIHARTENOLU E8
- Analizę konstrukcji wanny pieca PEKAT 2 ilustruje rys. 1



Rys. 1. Wanna pieca PEKAT 2, 1- jedno mieszadło cieczy, 2- komora grzejna pieca, 3- dwa mieszadła cieczy, 4- chłodzony wsad, 5- system chłodzenia kąpieli hartowniczej, 6- kierunek ruchu cieczy hartowniczej

Przeprowadzone próby hartownia detali ze stali 28MnCrB5 z zastosowaniem chłodziw polimerowych, którymi zalano wannę olejową po jej wcześniejszym dokładnym wyczyszczeniu – bez żadnych jej zmian konstrukcyjnych. Stężenie polimeru w wannie wynosiło 6%. Uzyskane wyniki uzyskanych twardości były dalekie od oczekiwań. Wynikało to z małego przechłodzenia detali oraz z ich niestabilności w czasie załadunku do wanny, ich przemieszczaniem i przyleganiem do siebie. Detale do obróbki były ułożone w koszu hartowniczym jak pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Detale do obróbki ułożone w koszu hartowniczym, 1-kosz, 2- przekładka, 3- detale

Zastosowanie tworzyw polimerowych wymaga (szczególnie w piecach z atmosferą regulowaną) zwrócenia uwagi na zmianę potencjału atmosfery związanej z przedostawaniem się do komory pieca pary wodnej, powoduje to korozję elementów transportowych (toru jezdnego, wsadu, windy zanurzeniowej). Wymaga to starannej eksploatacji tych urządzeń i ciągłego nadzoru.

Objętość wanny hartowniczej pieca PEKAT 2 wynosi 5000 litrów. W konwencjonalnych operacjach chłodzenia w oleju objętość chłodziwa powinna wynosić 10 litrów oleju na każdy kilogram wsadu brutto tj. masa wsadu + masa kosza i platformy zanurzeniowej. Do operacji chłodzenia w kąpielach polimerowych proporcja ta powinna wynosić 12–15 litrów na kilogram wsadu brutto – dane producenta POLIHARTENOLU E8 firmy „PRO-IMP” Sp. z o.o. w Rzeszowie. W celu zapewnienia równomiernego pokrywania polimerem wszystkich powierzchni hartowanych detali, oraz wyeliminowania zjawiska zalegania przegrzanej kąpieli w strefie wsadu niezbędne jest intensywne mieszanie kąpieli polimerowej. Zakłada się, że objętość chłodziwa przepływającego przez strefę wsadu w ciągu minuty powinna odpowiadać masie wsadu brutto. Wydajność godzinowa pompy powinna być około pięć razy większa niż objętość chłodziwa w wannie.

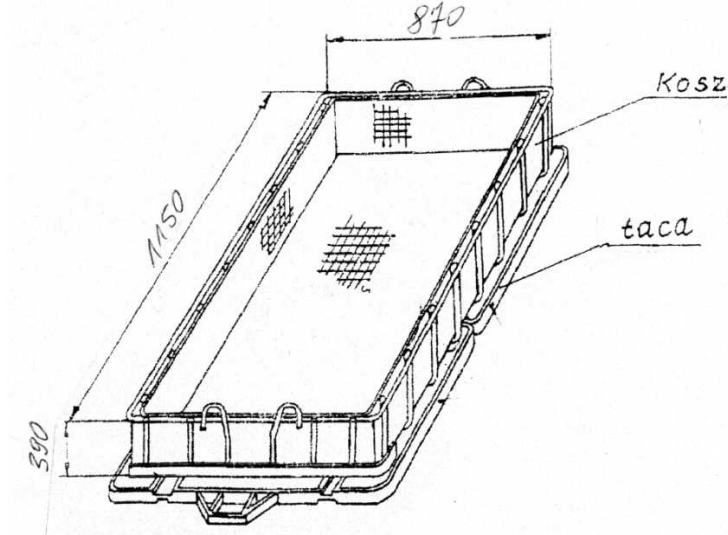
2. Przebieg wykonania badań

W wyniku przeprowadzonych analiz procesu hartowania stali 28MnCrB5 uznano, iż głównymi przyczynami nie uzyskiwania wymaganej twardości zakładzie obróbki cieplnej były:

1. niewłaściwe ułożenie detali do nagrzewu – detale były układane w koszu bez zachowania ich stabilnej pozycji i odpowiednio dużej odległości między poszczególnymi detalami,
2. nie zachowanie wymaganej masy wsadu w stosunku do pojemności wanny,
3. występowało za duże stężenie polimeru w cieczy chłodzącej,
4. był mało intensywny obieg cieczy chłodzącej powodujący zaleganie przegrzanej kąpieli w strefie wsadu.

3. Zaproponowane zmiany

1. Wyeliminowano kosze, rys.3, w których dotychczas załadowywano wsad do pieca na rzecz specjalnych przekładek ustalających, które pozwalają na ułożenie części do obróbki bezpośrednio na tacy przemieszczającej się po torze załadowczy. Takie ułożenie wsadu zapewnia wymagane odległości między detalami i ułatwia przepływ cieczy chłodzącej, rys.4

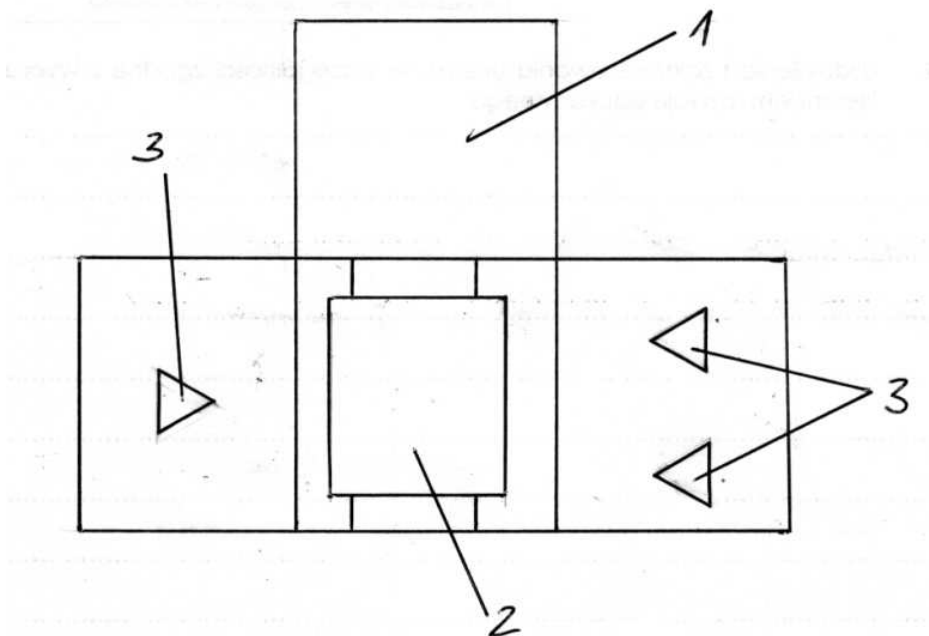


Rys. 3. Kosz z tacą do obróbki



Rys. 4. Zdjęcie detali (belek) na tacy z przekładkami

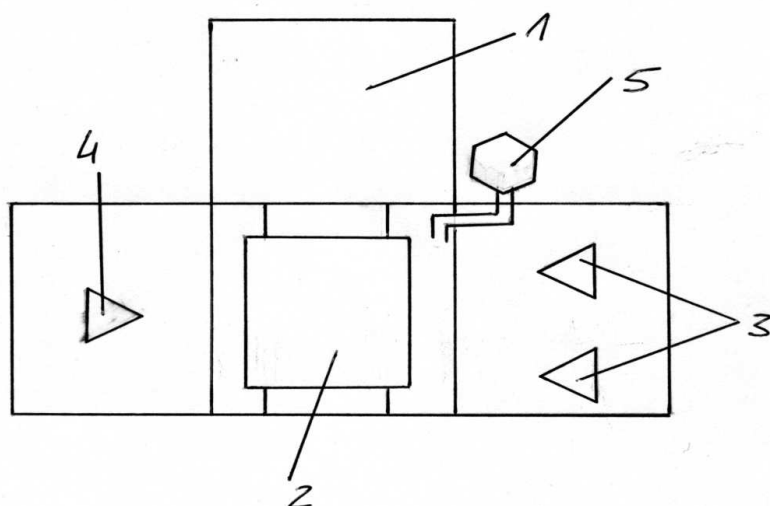
2. Zmodernizowano system i intensywność przepływu kąpieli. Wanna chłodząca pieca PEKAT 2 posiada 3 mieszadła śmigłowe usytuowane jak na rysunku 5.



Rys 5. Piec PEKAT 2 przed modernizacją, 1- komora grzejna pieca, 2- wsad pieca, 3- mieszadła

Dwa mieszadła znajdują się po jednej stronie pieca, a po drugiej znajduje się jedno mieszadło. Takie usytuowanie mieszadeł jest wystarczające do chłodzenia wsadu w oleju hartowniczym, ale było niewystarczające przy napełnieniu wanny cieczą polimerową. Ruch cieczy polimerowej spowodowany tym układem mieszadeł był mało intensywny i powodował zaleganie przegrzanej kąpieli w strefie wsadu co powodowało niemożność odebrania wymaganej ilości ciepła od wsadu.

Opracowano i zaproponowano system obiegu cieczy polimerowej, a następnie wykonano modernizację wanny – rysunek 6.

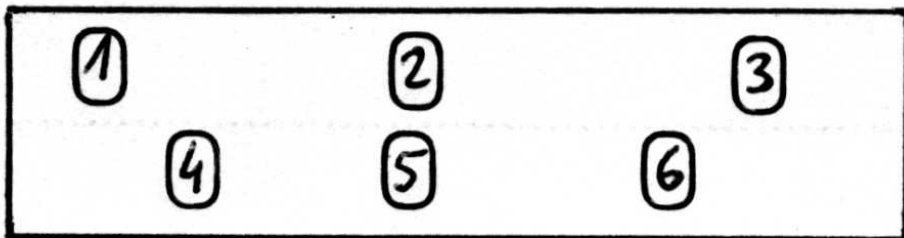


Rys. 6. PEKAT 2 po modernizacji, 1-komora grzejna pieca, 2- wsad pieca, 3- pracujące mieszadła, 4- mieszadło wyłączone, 5- pompa mieszająca ciecz polimerową o dużej wydajności

W wyniku przeprowadzonych prac modernizacyjnych wyłączono z obiegu jedno mieszadło jak to pokazano na rys.6, równocześnie zainstalowano pompę odśrodkową o dużej wydajności, po stronie już istniejących dwóch mieszadeł śmigłowych. Równocześnie ukierunkowano przepływ cieczy chłodzącej specjalnymi kierownicami wzdłuż elementów hartowanych, od dna wanny do powierzchni. Ten system obiegu cieczy polimerowej zlikwidował zaleganie przegrzanej kąpieli w strefie chłodzonego wsadu, równocześnie intensywnie schładzał wsad detali hartowanych. Uzyskane wyniki twardości były równomierne na całej powierzchni. Porównanie wybranych pomiarów twardości przed i po modernizacji wanny uzyskane dla stali 28MnCrB5, tabela 2, miejsca pomiaru rys.7.

Tabela 2 Pomiary twardości stali 28MnCrB5

Twardość mierzona przed modernizacją wanny, HRC		Miejsca pomiaru twardości na próbce	Twardość mierzona po modernizacji wanny, HRC	
pomiar 1	pomiar 2		pomiar 1	pomiar 2
42	40	1	49	51
36	34	2	49	50
34	35	3	51	50
32	33	4	47	48
39	38	5	48	49
33	24	6	50	49

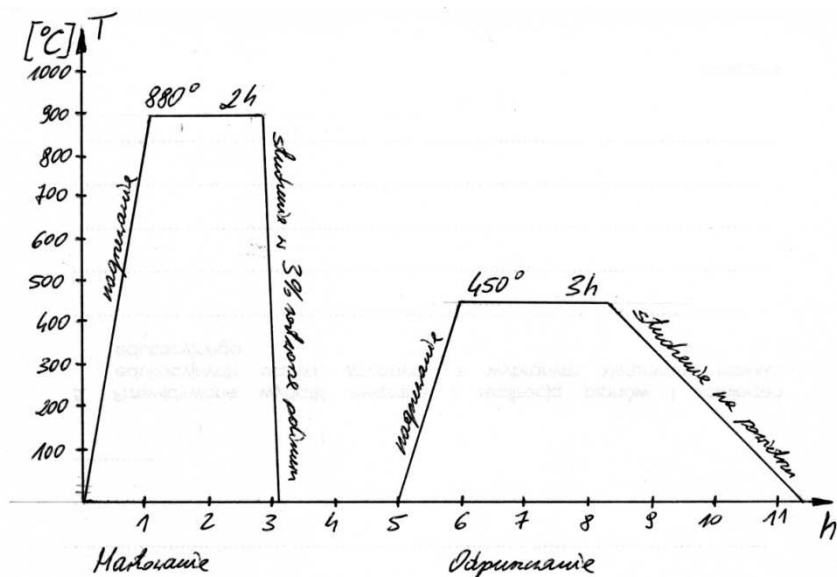


Rys. 7. Miejsca pomiary twardości próbki

4. Analiza wyników badań oraz wnioski

Próbną obróbka cieplna belek, rysunek 8, wykonana po wykonaniu prac modernizacyjnych:

- zmodernizowaniu systemu obiegu cieczy polimerowej, rysunek 6
- ułożeniu detali do obróbki wykorzystaniem przekładek bezpośrednio na tacy, rysunek 4,
- dobraniu masy wsadu wraz z oprzyrządowaniem, masa wsadu ma wynosić 400kg,
- dobraniu odległości między detalami, odległość między detalami ma wynosić 30mm, tyle ile wynosi grubość elementów hartowanych,
- dobraniu stężenia POLIHARTENOLU E8, stężenie wynosi 3%,
- zmianie obiegu cieczy chłodzącej na obieg wymuszony przy pomocy dwóch mieszadeł śmigłowych i pompy wydajności 1600 l/min powodujących obieg cieczy w tym samym kierunku,
- wprowadzenie dwukrotnie zwiększonego chłodzenia cieczy z wodą obiegową,
- dobraniu temperatury cieczy polimerowej, temperatura ma wynosić 25 °C,
- wyznaczeniu krzywych obróbki cieplnej, której przebieg ilustruje rysunek 9.



Rys. 9. Wyznaczone krzywe obróbki cieplnej

Jak pokazały pomiary twardości obrabianych detali zarówno po hartowaniu tabela 2, jak i po przeprowadzeniu operacji odpuszczania, tabela 3 świadczą, że przeprowadzona modernizacja oraz uzyskane wyniki próby obróbki cieplnej stali 28MnCrB5 potwierdziły założenia, a tym samym rekomendowane są do modernizacji i stosowania w produkcji.

Tabela 3 Pomiary twardości detali

Miejsca pomiaru twardości na próbce	Twardość mierzona po odpuszczaniu i modernizacji wanny, HRC	
	pomiar 1	pomiar 2
1	46	46
2	45	45
3	45	56
4	44	45
5	48	47
6	47	48

Bardzo ważnym czynnikiem wynikającym z wprowadzenia obróbki cieplnej w cieczach polimerowych zamiast w oleju jest ograniczenie emisji dymów i oparów emitowanych podczas obróbki cieplnej z chłodzeniem w olejach. Wpływa to w sposób znaczący na ochronę środowiska i na poprawę BHP. Ważnym czynnikiem również jest, aby czasie eksploatacji pilnować stężenia

kąpieli polimerowej, kontrola PH, dodatków antykorozyjnych i antypiennych oraz systematycznie usuwać osad (zendry) z dna wanny.

LITERATURA

1. Blicharski M. Inżynieria powierzchni, WNT. Warszawa 2009.
2. Blicharski M. Inżynieria materiałowa, WNT, Warszawa 2010.
3. Burakowski t. Wierzchom T. Inżynieria powierzchni metali .WNT, Warszawa 1995.
4. Dobrzański L. Metalowe materiały inżynierskie WNT. Warszawa 2004.
5. Materiały PRO-IMP Rzeszów.

THE ANALYSIS OF THE PEKAT 2 FURNACE ADAPTABILITY TO HARDENING, USING POLYMER LIQUIDS

Summary

The article contains the modernization of PEKAT 2 furnace and utilizing it for hardening, using polymer liquids conception. In the article, the analysis of the essential modernization works, the construction of the hardening bath, batch arrangement etc. have been described. The article contains the results of the beam type hardening in polymer liquids and the elaborated modernization changes analysis.

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ADAPTACJI PIECA PEKAT 2 DO HARTOWANIA Z WYKORZYSTANIEM CIECZY POLIMEROWYCH

Streszczenie

Artykuł zawiera koncepcję modernizacji pieca PEKAT 2 i wykorzystanie go do hartowania z wykorzystaniem cieczy polimerowych. W artykule zawarto analizę niezbędnych prac modernizacyjnych pieca, konstrukcji wanny hartowniczej, ułożeń wsadu itd. Zawarto wyniki hartowania elementu typu belka w cieczach polimerowych i przedstawiono analizę opracowanych zmian modernizacyjnych.

Dr inż. Tomasz GORECKI
Instytut Technologicznych Systemów Informatycznych
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
e-mail: t.gorecki@pollub.pl

ŁAŃCUCHY DOSTAW WĘGLA W UJĘCIU PROBABILISTYCZNYM

Wstęp

Jednym z podstawowych kierunków zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego Polski jest dywersyfikacja kompleksu paliwowo-energetycznego, polegająca na stopniowym zmniejszaniu zużycia szybko malejących, światowych zapasów ropy i gazu, kosztem coraz większego wykorzystywania praktycznie niewyczerpywalnych zasobów węgla.

Przyjęta dnia 10 listopada 2010 roku przez Radę Ministrów Polityka energetyczna Polski do 2030 roku stanowi, iż węgiel pozostanie gwarantem bezpieczeństwa energetycznego kraju. Paliwo to ma szczególne znaczenie m.in. dla sektora elektroenergetyki, ponieważ w przeważającej części zaporzebowanie na energię elektryczną zaspokajane jest w oparciu o węgiel, co czyni Polskę jednym z najbardziej stabilnych pod względem bezpieczeństwa energetycznego krajów Unii Europejskiej.

Różnorodność marek węgla, występująca w polskich pokładach węgla kamiennego i brunatnego prowadzi do znacznego zwiększenia kosztów utrzymania zapasów w systemach jego dystrybucji. A to z kolei, wymaga określenia nowych dróg doskonalenia struktur łańcuchów dostaw i obniżenia kosztów obsługi transportowej na rynku węgla.

W niniejszej pracy rozpatrzono łańcuchy dostaw węgla z kopalń do elektrowni, w trzech aspektach: technicznym, technologicznym i organizacyjnym. Łańcuch dostaw w aspekcie technicznym przedstawiono jako zbiór środków transportu, maszyn, urządzeń i mechanizmów umożliwiający przepływ węgla z kopalni do punktów jego przeróbki.

W aspekcie technologicznym i organizacyjnym łańcuch dostaw węgla stanowią wzajemne powiązania i oddziaływania jego elementów w procesie realizacji załadunku, przewozu i wyładunku u odbiorcy.

Jego elementy to:

- środki transportu (wagony) w procesie i w oczekiwaniu na załadunek;
- fronty ładunkowe z urządzeniami ładunkowymi;
- urządzenia przeładunkowe;
- maszyny i place składowe wraz z wyposażeniem.

Wymagania podstawowe, stawiane łańcuchom dostaw węgla to:

- wymagania techniczne – związane z mechanizacją i automatyzacją prac ładunkowych, wraz z przewozem węgla od nadawcy do odbiorcy,
- wymagania technologiczne – dotyczące gotowości węgla do załadunku i przewozu, płynności operacji początkowo-końcowych, bezpieczeństwa ładunku i środków transportu,
- wymagania logistyczne – związane z planowaniem i płynną organizacją
- dostaw węgla, kontrolą poziomu zapasów, przepływem strumieni informacyjnych,
- wymagania ekonomiczne – dotyczą minimalnych nakładów finansowych przy zapewnieniu realizacji wszystkich podstawowych zadań.

Podstawowymi funkcjami łańcuchów dostaw węgla są:

- zapewnienie racjonalnej technologii załadunku,
- wybór środka transportu,
- zapewnienie racjonalnej technologii wyładunku,
- magazynowanie węgla (w przypadku intensyfikacji procesów i pojawiania się nowych wejść i wyjść do i z systemu).

Pod pojęciem procesu technologicznego w łańcuchach dostaw węgla będzie rozumiany ciąg operacji z ładunkiem i środkami transportu, realizowanych w każdym jego etapie. Proces ten dzieli się na podstawowy i wspomagający. Proces podstawowy obejmuje:

- operacje z ładunkiem,
- operacje z próżnymi środkami transportu,
- operacje z załadowanymi środkami transportu,
- operacje przemieszczania taboru próżnego i ładownego.

Wymienione wyżej części procesu technologicznego są ze sobą wzajemnie powiązane. Proces wspomagający obejmuje sporządzanie dokumentów przewozowych, prace związane z przepływem strumieni informacyjnych itp. Proces ten w niniejszej pracy nie będzie rozpatrywany.

1. Podstawy matematyczne analizy łańcuchów dostaw węgla

Charakter procesów zachodzących w całym łańcuchu dostaw węgla jest stochastyczny, zarówno w części dotyczącej załadunku (wyładunku) węgla, jak i w części dotyczącej obsługi środków transportu.

W związku z powyższym w ich analizie stosuje się metody badań operacyjnych, a w szczególności: rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej, teorii masowej obsługi, teorii niezawodności i modelowania symulacyjnego.

Wymienione metody służą do rozwiązywania określonych zadań. I tak:

- rachunek prawdopodobieństwa i statystykę matematyczną wykorzystuje się w określaniu parametrów strumieni wejścia w systemach wyładunku,

strumieni wejścia wagonów próżnych w systemach załadunku, czasu obsługi wagonów próżnych i ładownych w systemie;

- teorię obsługi masowej wykorzystuje się w określaniu parametrów obsługi wagonów próżnych i ładownych na frontach ładunkowych, czasu oczekiwania na operacje ładunkowe, dodatkowego czasu obsługi wagonów (ważenie, czyszczenie, itd.), ogólnego czasu przebywania wagonów w systemie;
- teorię niezawodności wykorzystuje się w budowie modeli sprawności elementów systemu oraz w poznaniu zasad określania końcowych parametrów ekonomicznych systemu.

W ostatnim trzydziestoleciu szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach techniki, radiotechniki, mechaniki precyzyjnej i budowie maszyn znalazła teoria niezawodności do rozwiązywania zadań zarządzania jakością.

Cechą odróżniającą łańcuchy dostaw węgla od systemów mechanicznych jest terytorialne rozproszenie urządzeń, maszyn i mechanizmów, które stanowią złożone podsystemy mechaniczne.

Obiektem badań w niniejszej pracy jest złożony system, składający się z szeregu autonomicznych elementów, zajętych realizacją jednego złożonego procesu technologicznego, rozpatrywany z pozycji teorii niezawodności.

2. Pojęcie uszkodzenia i przywrócenia zdolności funkcjonalnej w łańcuchach dostaw węgla

Pod pojęciem niezawodności będzie rozumiana zdolność elementu do realizacji zadanych funkcji z zachowaniem swoich parametrów eksploatacyjnych, w określonych normach, w zadanym okresie czasu.

Elementem łańcucha dostaw będzie mechanizm lub urządzenie realizujące określoną czynność procesu technologicznego. Stopień szczegółowości procesu technologicznego (ilość czynności) zależy od:

- celu i dokładności obliczeń,
- skali oddziaływania czynników technicznych oraz organizacyjnych na czas i technologię czynności,
- możliwości włączania/wyłączania danej czynności do i z procesu technologicznego.

Funkcjonowanie łańcucha dostaw nie jest możliwe przy braku elementów łączących, takich jak układy torowe, łącznice, węzły przeładunkowe itp., które określają w znacznym stopniu niezawodność całego systemu. Elementy łączące wchodzi również w skład elementów realizujących daną czynność. System uważa się za zdolny do pracy w chwili t , jeśli wszystkie podsystemy realizują swoje funkcje, tj. dokonuje się załadunek, przewóz i wyładunek węgla.

Dowolną przerwę w realizacji funkcji przez podsystem, włączając postój z powodu braku węgla lub wagonu, nazywać będziemy uszkodzeniem. Wszystkie uszkodzenia systemu, tj. przyczyny zatrzymania się procesu załadunku

nku, przewozu lub wyładunku mogą mieć charakter techniczny lub technologiczny. Uszkodzenia techniczne związane są z utratą zdolności do pracy, z powodu technicznych usterek oddzielnych elementów podsystemu. Niezawodność techniczna elementu jest funkcją częstotliwości i czasu ich uszkodzeń technicznych. Charakteryzuje ona stopień dokładności technicznej elementu oraz określa jego wpływ na wydajność systemu. Przywrócenie zdolności do pracy elementu oznacza usunięcie usterki w elemencie lub jego wymianę. Uszkodzenia technologiczne związane są z realizacją przez poszczególne elementy czynności wspomagających, wymagających przerwania pracy podstawowych mechanizmów systemu. Można je podzielić na następujące grupy:

- związane z realizacją czynności poprzedzających cykl pracy centrum podsystemu,
- związane z realizacją czynności następujących po cyklu pracy centrum podsystemu,
- związane z realizacją czynności technologicznej przez dowolny element, która nie pokrywa się z pracą centrum podsystemu,
- związane z przejściem podsystemu do nowego stanu; związane z parametrami technicznymi węgla.

Niezawodność technologiczna jest prawdopodobieństwem jednoczesnej pracy elementu i centrum podsystemu. Tak więc, niezawodność techniczna jako funkcja częstotliwości i czasu uszkodzeń technologicznych charakteryzuje stopień zgodności czynności zachodzących w centrum i na peryferiach podsystemu, podczas realizacji zadanego procesu technologicznego. Na przykład, jeżeli niezawodność technologiczna toru z wywrotnicą wagonową wynosi 0,85, to oznacza, że 85% czasu zajęcia tego toru pokrywa się z czasem pracy wywrotnicy wagonowej, a 15% czasu nie pokrywa się (wywrotnica wagonowa pracuje, a wagonu nie ma). Przywrócenie zdolności do pracy następuje z chwilą zakończenia czynności technologicznych, które nie są wykonywane jednocześnie z pracą centrum podsystemu.

Niezawodność techniczna i technologiczna charakteryzuje racjonalność i efektywność struktury podsystemów i całego łańcucha dostaw.

3. Określenie niezawodności elementów łańcucha dostaw węgla, trakowanych jako złożony system obiektów materialnych

Miernikami niezawodności elementów łańcucha dostaw (mechanizmów, maszyn, urządzeń) są charakterystyki ilościowe, wynikające z celu funkcjonowania i warunków eksploatacji.

Ogólnym miernikiem niezawodności elementu i całego łańcucha dostaw będzie prawdopodobieństwo realizacji postawionych zadań w zadanym okresie czasu i w zadanych warunkach eksploatacji.

Realizacja przez dany element swoich funkcji jest złożonym zdarzeniem A składającym się ze zdarzeń: A_1 – w chwili konieczności użycia element

znajduje się w wymaganym położeniu t_3 ; A_2 – przygotowanie do użycia w zadanym czasie τ_n ; A_3 – brak uszkodzeń w okresie użytkowania τ_{np} , a więc:

$$A = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \quad (1)$$

Prawdopodobieństwo P zdarzenia A określa następująca zależność:

$$P = r(t_3, \tau_n) \cdot P(t_3, \tau_n) \cdot P(t_3, \tau_{np}) \quad (2)$$

gdzie: $r(t_3, \tau_n)$ – prawdopodobieństwo zdarzenia A_1
 $P(t_3, \tau_n)$ – prawdopodobieństwo zdarzenia A_2 pod warunkiem wystąpienia zdarzenia A_1 ;
 $P(t_3, \tau_{np})$ – prawdopodobieństwo zdarzenia A_3 pod warunkiem wystąpienia zdarzeń A_1 i A_2 .

Prawdopodobieństwo $r(t_3, \tau_n)$ jest miernikiem niezawodności elementu; prawdopodobieństwo $P(t_3, \tau_n)$ – miernikiem niezawodności elementu w okresie przygotowania do użycia; prawdopodobieństwo $P(t_3, \tau_{np})$ – miernikiem niezawodności elementu w okresie eksploatacji.

Prawdopodobieństwo P jest ogólnym miernikiem niezawodności elementu. Szczególnymi miernikami niezawodności elementów są: okres eksploatacji do momentu uszkodzenia i intensywność uszkodzeń, czas przywrócenia zdolności funkcjonalnej i intensywność przywrócenia zdolności do pracy. W obliczeniach mierników niezawodności wykorzystamy metody oparte na klasycznej teorii rachunku prawdopodobieństwa.

Jeżeli dowolne usterki pracującego w sposób ciągły elementu są usuwane natychmiast ($Y_L = 0$), brak jest profilaktyki, liczba powrotów do zdolności funkcjonalnej jest nieograniczona i wszystkie prawdopodobieństwa zdarzenia x są niezależne, z jednakową funkcją gęstości rozkładu

$$f_1(x) = f(x) = F'(x) \quad (3)$$

to momenty uszkodzeń stanowią prosty strumień przywracania zdolności funkcjonalnej. Szczególnym przypadkiem prostego strumienia przywracania zdolności funkcjonalnej jest potok Poissona, dla którego gęstość rozkładu:

$$f(x) = \lambda - e^{-\lambda x}; F = 1 - e^{-\lambda x}; \lambda = 0 \quad (4)$$

Ogólny proces przywracania zdadności funkcjonalnej, dla którego:

$$f_1(x) = [1 - F(x)]; \int_0^{\infty} x f(x) dx \quad (5)$$

jest stacjonarnym procesem przywracania zdadności funkcjonalnej. Dla elementów łańcucha dostaw węgla, traktowanego jako system wielofazowy niezwykle ważnym jest liczba uszkodzeń w okresie t , nazywana funkcją przywracania zdadności oraz średnia liczba wymian elementów $H(t)$.

$$H(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi_n(t) \quad (6)$$

Dla procesu stacjonarnego

$$H(t) = t; \int_0^t x f(x) dx = \frac{1}{M[x]} \quad (7)$$

Funkcja gęstości przywracania zdadności funkcjonalnej ma postać:

$$h(t) = H'(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \Phi'_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \quad (8)$$

Prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy elementu w okresie $t, t + \Delta t$ przy $\Delta t = 0$ wynosi:

$$P(t, t + \Delta t) = 1 - h(t)\Delta t + O(\Delta t) \quad (9)$$

Tak więc, $h(t)$ w przybliżeniu jest równe bezwarunkowemu prawdopodobieństwu uszkodzenia w jednostce czasu, zaś intensywność uszkodzeń

$$\lambda(t) = \frac{f(x)}{1 - F(t)} \quad (10)$$

jest równa prawdopodobieństwu warunkowemu uszkodzeń w jednostce czasu, pod warunkiem, że do chwili t uszkodzeń nie było.

Dla stacjonarnego procesu przywracania zdadności funkcjonalnej

$$\lambda(t) = \text{const.} \quad (11)$$

Wiadomo, że przy $f(t) \rightarrow 0$ i $t \rightarrow \infty$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \frac{1}{T_s} \quad (12)$$

t_j z upływem czasu proces przywracania zdadności funkcjonalnej staje się stacjonarnym.

Biorąc pod uwagę powyższe rozważania można określić funkcję Nieszawodności $R_s(t)$, t_j prawdopodobieństwo tego, że w chwili t element jest zdolny do pracy. Element będzie zdolny do pracy w chwili t , jeżeli spełnione będzie jedno z następujących zdarzeń niezależnych:

- w okresie czasu t element funkcjonował bez awarii;
- w okresie czasu t było n awarii i n powrotów do zdadności ($n = 1, 2, 3, \dots$), przy czym ostatni powrót do zdadności miał miejsce na odcinku $x_1, x_1 + \Delta t$, $x_1 \leq t$ i w pozostałym czasie nie było więcej awarii.

Przy $\Delta x \rightarrow 0$ prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy elementu w chwili t , wynosi:

$$\int_0^t P(t-x) \sum_{n=1}^{\infty} Y_n(x) dx = \int_0^t P(t-x) h(x) dx \quad (13)$$

gdzie: $h(x) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n(x)$ – funkcja gęstości procesu, określonego chwilami czasu:

$$t_n = \sum_{i=1}^n (x_i + Y_i) \quad (14)$$

Stacjonarna wartość funkcji niezawodności wynika z twierdzenia Smitha:

$$R_r(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t P(t-x)h(x)dx = \frac{1}{T_s + \tau_b} \int_0^{\infty} P(t)dt = \frac{T_s}{T_s + \tau_b} \quad (15)$$

Analogicznie można określić prawdopodobieństwo $P(t, \tau)$, że element pracuje bez usterki w okresie (t, τ) . W przypadku stacjonarnym

$$P_s(\tau) = \lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t P(t, \tau) = \frac{1}{T_s + \tau_b} \int_{\tau}^{\infty} P(x)dx = R_r \frac{1}{T_s} \int_0^{\infty} P(x)dx \quad (16)$$

W teorii niezawodności niezwykle ważnym jest przypadek, kiedy:

$$\begin{aligned} F(t) &= 1 - e^{-\lambda t}; f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \\ G(t) &= 1 - e^{-\mu t}; q(t) = \mu \cdot e^{-\mu t} \end{aligned} \quad (17)$$

gdzie: λ – intensywność awarii;

μ – intensywność przywrócenia zdolności funkcjonalnej.

$$R_r(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (18)$$

Po podstawieniu (18) do wyrażenia (13) otrzymamy:

$$P(t + \tau) = e^{-\lambda(t+\tau)} = e^{-\lambda t} \cdot P(t) \quad (19)$$

czyli prawdopodobieństwo bezawaryjnej pracy w okresie $(t, t + \tau)$:

$$P(t + \tau) = \left[\frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \right] \cdot e^{-\lambda\tau} \quad (20)$$

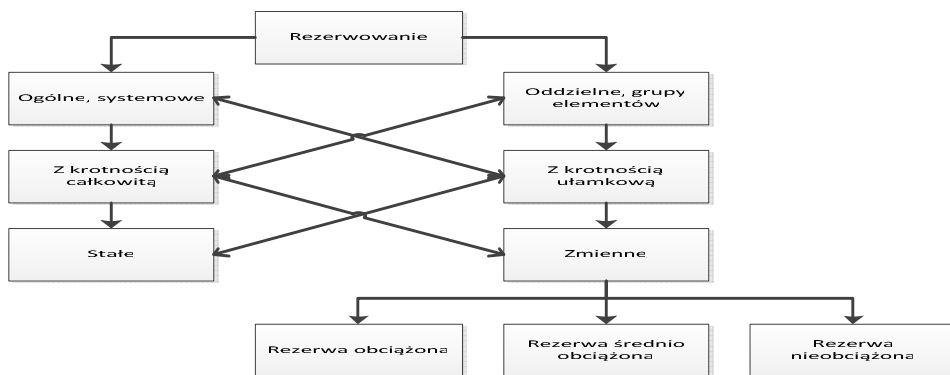
Wielkości λ i μ w procesie stacjonarnym, przy $t \rightarrow \infty$ są stałe, tj.:

$$\lambda = \frac{1}{T_s} = \text{const.}; \mu = \frac{1}{\tau_b} = \text{const.} \quad (21)$$

Wartości T_s i τ_b określane są z próbki statystycznej.

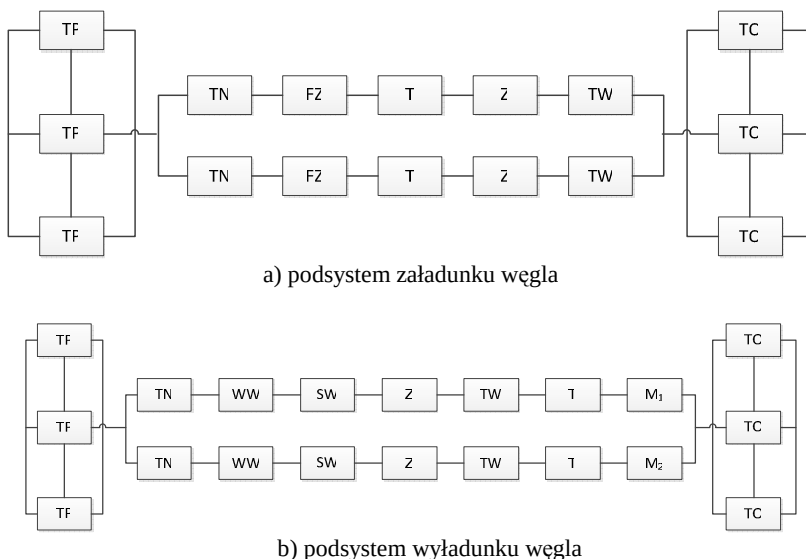
4. Określenie wskaźników niezawodności w łańcuchach dostaw węgla

Wskaźniki niezawodności wygodnie jest określić, jeśli łańcuch dostaw przedstawiony zostanie w postaci schematu blokowego. Budując schemat blokowy można zauważyć, iż kolejność położenia poszczególnych elementów może różnić się od kolejności rzeczywistej w łańcuchu dostaw. Wynika to z następującego sformułowania zadania: w schematach blokowych elementy łączone są szeregowo (łączenie podstawowe) – jeżeli uszkodzenie jednego elementu powoduje uszkodzenie całego systemu lub równoległe (łączenie rezerwowe) – jeżeli uszkodzenie jednego elementu nie powoduje uszkodzenia całego systemu. Elementy oznaczone są prostokątami lub kołami z przypisanym numerem lub indeksem. W zależności od sposobu łączenia elementów w systemie schematy blokowe mogą być szeregowo – wszystkie elementy znajdują się w łączeniu podstawowym, równoległe i mieszane (część elementów znajduje się w łączeniu podstawowym, zaś część – w łączeniu rezerwowym). Ze względu na sposób rezerwowania schematy blokowe mogą być z rezerwowaniem systemowym i rezerwowaniem grupy elementów (rys. 1).



Rys. 1. Sposoby rezerwowania w systemach

Przykłady realnych schematów blokowych łańcuchów dostaw węgla z kopalni do odbiorców transportem kolejowym pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przykłady realnych schematów blokowych podsystemów łańcucha dostaw węgla

Na rysunku 2 przyjęto następujące oznaczenia:

- TP – tory przyjazdowe;
- TN – tory do napychania wagonów;
- FZ – front załadunkowy;
- T – taśmociąg;
- Z – zasobnik;
- TW – tory wyciągowe;

- TO – tory odjazdowe;
- WW – wywrotnica wagonowa;
- SW – siatka zsypu węgla;
- M1 – magazyn operacyjny;
- M2 – magazyn rezerwowy.

Z rysunku 2 wynika, że łańcuchy dostaw węgla są złożonymi, mieszanymi systemami, wzajemnie powiązanych mechanizmów i urządzeń.

Określenie podstawowych wskaźników niezawodności takich systemów sprowadza się do obliczania prawdopodobieństwa bezawaryjnej ich pracy w okresie czasu T .

Wskaźniki niezawodności wygodnie jest określić dla prostych podsystemów – grupy elementów, łączonych tylko w sposób podstawowy lub tylko w sposób równoległy. Dla takich podsystemów znane są stosunkowo proste zależności analityczne, określające intensywność uszkodzeń i przywracania stanu zdadności, średni czas przywracania zdadności, prawdopodobieństwo pracy bezawaryjnej w określonym czasie itp.

W przypadku łańcuchów dostaw węgla mamy do czynienia z systemem autonomicznych maszyn i urządzeń, o wysokim stopniu uszkodzeń technologicznych. W takich systemach, wspomniane wyżej zależności analityczne nie mogą znaleźć zastosowania, gdyż postoje technologiczne stanowią w nich nawet do 50% czasu roboczego i wielokrotnie przewyższają postoje z przyczyn technicznych.

Rozważmy dwa proste systemy: szeregowy (podstawowy) i rezerwowy (równoległy). Niezależnie od struktury systemu do obliczeń niezbędne są następujące charakterystyki niezawodnościowe elementów: r_{ml} – współczynnik niezawodności technicznej elementu; r_{cl} – współczynnik niezawodności technologicznej elementu; λ_{ml} – intensywność uszkodzeń technicznych; λ_{cl} – intensywność uszkodzeń technologicznych. Średni czas pracy bezawaryjnej T_{sml} i T_{scl} i średni czas przywracania zdadności τ_{bml} ; τ_{bcl} – dla dwóch rodzajów uszkodzeń określone są następująco:

$$T_{sml} = \frac{1}{\lambda_{ml}} \quad ; \quad T_{scl} = \frac{1}{\lambda_{cl}} \quad (22)$$

$$\tau_{bml} = \frac{1}{\mu_{ml}} \quad ; \quad \tau_{bcl} = \frac{1}{\mu_{cl}} \quad (23)$$

4.1. Obliczenia dla systemów szeregowych (podstawowych)

Jeżeli system składa się z n elementów połączonych szeregowo to jego niezawodność jest równa:

$$R_{go} = \prod_{l=1}^n r_{gl} \quad (24)$$

ponieważ $r_{gl} = r_{ml} \cdot r_{cl}$ to

$$R_{go} = \prod_{l=1}^n [(r_{ml}) \cdot r_{cl}] \quad (25)$$

W przypadku prostego strumienia uszkodzeń, kiedy intensywność uszkodzeń i przywracania zdatości są stałe w czasie, niezawodność i -tego elementu określa następująca zależność:

$$r_{gl} = e^{-\lambda_{ml}t} \cdot e^{-\lambda_{cl}t} = e^{-[\lambda]_{ml} + \lambda_{cl}}t \quad (26)$$

a więc:

$$R_{go} = e^{-[\lambda]_{m1} + \lambda_{c1}}t \cdot e^{-[\lambda]_{m2} + \lambda_{c2}}t \cdot e^{-[\lambda]_{mn} + \lambda_{cn}}t = \exp \left[-t \left(\sum_1^n \lambda_{ml} + \sum_1^n \lambda_{cl} \right) \right] \quad (27)$$

stąd:

$$\lambda_o = \sum_1^n \lambda_{ml} + \sum_1^n \lambda_{cl} \quad (28)$$

gdzie: λ_o – intensywność uszkodzeń systemu szeregowego, składającego się z n elementów.

Stąd:

$$T_{spo} = \frac{1}{\lambda_o} = \frac{1}{\sum_1^n \lambda_{ml} + \sum_1^n \lambda_{cl}} \quad (29)$$

gdzie: T_{spo} – średni czas bezawaryjnej pracy systemu.

Zgodnie z zależnością (15) średni czas przywracania zdadności systemu szeregowego τ_{bo} wznosi:

$$\tau_{bo} = \frac{T_{spo}(1 - R_{go})}{R_{go}} \quad (30)$$

Po podstawieniu R_{go} i T_{spo} otrzymamy (patrz (27) i (29)):

$$\tau_{bo} = \frac{1 - e^{-\left(\sum_1^n \lambda_m + \sum_1^n \lambda\right)t}}{\left(\sum_1^n \lambda_{ml} + \sum_1^n \lambda_{cl}\right) \cdot e^{-\left(\sum_1^n \lambda_m + \sum_1^n \lambda\right)t}} \quad (31)$$

zaś intensywność przywracania stanu zdadności wynosi:

$$\mu_o = \frac{1}{\tau_{bo}} = \frac{\left(\sum_1^n \lambda_{ml} + \sum_1^n \lambda_{cl}\right) \cdot \exp\left[-t\left(\sum_1^n \lambda_{ml} + \sum_1^n \lambda_{cl}\right)\right]}{1 - \exp\left[-t\left(\sum_1^n \lambda_{ml} + \sum_1^n \lambda_{cl}\right)\right]} \quad (32)$$

Prawdopodob. bezawaryjnej pracy systemu w czasie $(t, \Delta t)$ określa się w celu:

- ustanowienia rodzaju obsługi;
- określenia wydajności systemu i dokonania jego syntezy według zadanych parametrów.

W przypadku pierwszym określa się jedynie uszkodzenia techniczne. Prawdopodobieństwo pracy bezawaryjnej $P_{go}(t, \Delta t)$ określa zależność:

$$P_{go}(t, \Delta t) = \frac{\mu_{mo}}{\lambda_{mo} + \mu_{mo}} + \frac{\lambda_{mo}}{\lambda_{mo} + \mu_{mo}} \cdot e^{-\left(\lambda_{mo} + \mu_{mo}\right)t} \quad (33)$$

gdzie: λ_{mo} – intensywność uszkodzeń technicznych:

$$\lambda_{mo} = \sum_1^n \lambda_{ml} \quad (34)$$

μ_{mo} – intensywność przywracania zdolności po uszkodzeniu technicznym:

$$\lambda_{mo} = \frac{\sum_1^n \lambda_{ml} \cdot \exp \left[-t \sum_1^n \lambda_{ml} \right]}{1 - \exp \left[-t \sum_1^n \lambda_{ml} \right]} \quad (35)$$

W przypadku drugim, prawdopodobieństwo pracy bezawaryjnej wynosi:

$$P_o(t, \Delta t) = \frac{\mu_o}{\lambda_o + \mu_o} + \frac{\lambda_o}{\lambda_o + \mu_o} \cdot e^{-(\lambda_o + \mu_o)t} \quad (36)$$

Znając charakterystyki niezawodności elementów systemu można modelować jego pracę i określać jego wskaźniki. Jest to szczególnie ważne w przypadku zwiększania niezawodności poprzez zamianę elementów przy zachowaniu istniejącej struktury systemu. Zależności (25) – (36)) pozwalają określić efektywność ekonomiczną zamiany elementów systemu, a nawet prognozować celowość takich zamian.

4.2. Obliczenia dla systemów równoległych

Jeżeli podsystem składa się z $(n+1)$ elementów połączonych równolegle i praca elementu jest zgodna z pracą centrum podsystemu, tj. $r_{cl} = 1$, to Niezawodność podsystemu równoległego wynosi:

$$R_{gp} = R_{mp} = 1 - \prod_1^{m+1} (1 - r_{ml}) \quad (37)$$

gdzie: m – ilość elementów równoległych.

Jeżeli $r_{cl} < 1$ to

$$R_{gp} = R_{mp} \cdot R_{cp} \quad (38)$$

gdzie: R_{mp} – współczynnik niezawodności technicznej podsystemu równoległego,

R_{cp} – współczynnik niezawodności technologicznej podsystemu równoległego.

$$R_{cp} = \min \left[1, (m+1)r_{cl} \right] \quad (39)$$

Maksymalna niezawodność podsystemów łączonych równolegle jest równa jedności, gdyż dowolny element tego podsystemu nie może wykonywać pracy o objętości większej niż centrum podsystemu. Jeżeli $r_{cl} < 1$, to objętość wykonywanej pracy zwiększa się proporcjonalnie do ilości elementów i niezawodność technologiczna sumuje się, tj.:

$$R_{cp} = \sum_1^{m+1} r_{cl} \quad (40)$$

i nie może być większa od jedności.

W przypadku, gdy podsystem równoległy jest częścią modułu i składa się z elementów peryferyjnych, niezawodność R_{gp} wynosi:

$$R_{gp} = \left[1 - \prod_1^{m+1} (1 - r_{ml}) \right] \cdot \min \left[1, (m+1)r_{cl} \right] \quad (41)$$

Dla wykładniczego rozkładu niezawodności

$$R_{gp} = \left[1 - \prod_1^{m+1} (1 - e^{-\lambda t}) \right] \cdot \min \left[1, (m+1)e^{-\lambda t} \right] \quad (42)$$

Intensywność uszkodzeń λ_p i okres pracy do uszkodzenia Ts_{pp} określone są przy następujących warunkach. Przy $r_{cl} = 1$, tj. uszkodzenia technologiczne nie występują:

$$Ts_{pp} = \frac{1}{\lambda_{ml}} \sum_0^m \frac{1}{j+1} = t_{mi} \sum_0^m \frac{1}{j+1} \quad (43)$$

gdzie: t_{mi} – okres pracy do uszkodzenia i -tego elementu; j – numer porządkowy elementu równoległego;

przy $r_{cl} < 1$

$$\lambda_p = \frac{1}{Ts_{pp}} = \frac{\lambda_{gl}}{\sum_0^m \frac{1}{j+1}} \quad (44)$$

ponieważ $\lambda_{gl} = \lambda_{ml} + \lambda_{cl}$, to

$$\lambda_p = \frac{\lambda_{ml}}{\sum_0^m \frac{1}{j+1}} + \lambda_{sp} \quad (45)$$

gdzie: λ_{sp} – intensywność uszkodzeń technologicznych podsystemu elementów równoległych.

Zgodnie ze wzorem (30)

$$\lambda_{sp} = \frac{\mu_{sp} (1 - R_{cp})}{R_{cp}} \quad (46)$$

Ponieważ $R_{cp} = \min[1, (m+1)r_{cl}]$, to:

$$\lambda_{sp} = \frac{\mu_{sp} \{1 - \min[1, (m+1)r_{cl}]\}}{\min[1, (m+1)r_{cl}]} \quad (47)$$

zaś intensywność przywracania zdolności μ_{sp} :

$$\mu_{sp} = \frac{\lambda_{cl}}{\sum_0^m \frac{1}{j+1}}, \text{ przy } (m+1)r_{cl} < 1 \quad (48)$$

$\mu_{sp} = 0$, przy $(m+1)r_{cl} > 1$
 przy $(m+1)r_{cl} > 1$, $\lambda_{sp} = 0$

i zgodnie ze wzorem (45):

$$\lambda_p = \frac{\lambda}{\sum_0^m \frac{1}{j+1}} \quad (49)$$

Zaś T_{spp} określa się ze wzoru (43)

przy $(m+1)r_{cl} < 1$, $\lambda_{sp} = \frac{\lambda_{cl}}{\sum_0^m \frac{1}{j+1}}$ (50)

wtedy $\lambda_p = \frac{\lambda_{ml} + \lambda_{cl}}{\sum_0^m \frac{1}{j+1}}$ (51)

Zaś: $TS_{pp} = \frac{1}{\lambda_p} = \frac{1}{\lambda_{ml} + \lambda_{cl}} \sum_0^m \frac{1}{j+1}$ (52)

Intensywność przywracania zdatości μ_p i średni czas przywracania zdatości T_p określa się z zależności:

$$R_{gp} = \frac{\mu_p}{\lambda_p + \mu_p} \quad (53)$$

stąd: $\mu_p = \frac{\lambda_p \cdot R_{gp}}{1 - R_{gp}}$ (54)

Ponieważ λ_p zależne jest od wartości $(m+1)r_{cl}$, to μ_p wprost proporcjonalnie zależy od tego wskaźnika tj.:

przy $(m+1)r_{cl} \geq 1$, zgodnie ze wzorem (51) otrzymamy:

$$\mu_p = \frac{\left[1 - \prod_1^{m+1} (1 - r_{ml})\right] \cdot \min[1, (m+1)r_{cl}] \lambda_{ml}}{\left\{1 - \left[1 - \prod_1^{m+1} (1 - r_{ml})\right] \cdot \min[1, (m+1)r_{cl}]\right\} \sum_0^m \frac{1}{j+1}} \quad (55)$$

przy $(m+1)r_{cl} < 1$, zgodnie ze wzorem (46) otrzymamy:

$$\mu_p = \frac{\left[1 - \prod_1^{m+1} (1 - r_{ml})\right] \cdot \min[1, (m+1)r_{cl}] (\lambda_{ml} + \lambda_{cl})}{\left\{1 - \left[1 - \prod_1^{m+1} (1 - r_{ml})\right] \cdot \min[1, (m+1)r_{cl}]\right\} \sum_0^m \frac{1}{j+1}} \quad (56)$$

Średni czas przywracania zdadności τ_p wynosi:
przy $(m+1)r_{cl} \geq 1$

$$\tau_p = \frac{\left\{ 1 - \left[1 - \prod_1^{m+1} (1 - r_{ml}) \right] \cdot \min[1, (m+1)r_{cl}] \right\} \sum_0^m \frac{1}{j+1}}{\left[1 - \prod_1^{m+1} (1 - r_{ml}) \right] \cdot \min[1, (m+1)r_{cl}] \lambda_{ml}} \quad (57)$$

przy $(m+1)r_{cl} < 1$

$$\tau_p = \frac{\left\{ 1 - \left[1 - \prod_1^{m+1} (1 - r_{ml}) \right] \cdot \min[1, (m+1)r_{cl}] \right\} \sum_0^m \frac{1}{j+1}}{\left[1 - \prod_1^{m+1} (1 - r_{ml}) \right] \cdot \min[1, (m+1)r_{cl}] (\lambda_{ml} + \lambda_{cl})} \quad (58)$$

4.3. Obliczenia dla struktur mieszanych

Wskaźniki niezawodności dla struktur mieszanych można określić jedynie po ich uprzednim rozdzieleniu na podsystemy proste. Niezawodność systemu mieszanego określa następująca zależność:

$$R_{gp} = \prod_1^{n_1} (r_{ml} \times r_{cl}) \cdot \prod_1^{n_2} \{ [1 - (1 - r_{ml})^2] \min(1, 2r_{cl}) \} \dots \quad (59)$$

Zaś intensywność uszkodzeń wynosi:

$$\begin{aligned} \lambda_k = & \left(\sum_1^{n_1} \lambda_{ml} + \sum_1^{n_1} \lambda_{cl} \right) + \left\{ \frac{\lambda_{ml}}{1,5} + \frac{\lambda_{cl} [1 - \min(1, 2r_{cl})]}{1,5 \cdot \min(1, 2r_{cl})} \right\} + \dots \\ & \dots + \left\{ \frac{r_{ml}}{\sum_0^m \frac{1}{j+1}} \right\} + \frac{\lambda_{cl} [1 - \min(1, (m+1)r_{cl})]}{\sum_0^m \frac{1}{j+1} \times \min[1, (m+1)r_{cl}]} \end{aligned} \quad (60)$$

a intensywność przywracania stanu zdadności funkcjonalnej:

$$\mu_k = \frac{\lambda_k \cdot R_{gk}}{1 - R_{gk}} \quad (61)$$

gdzie: $n_1, n_2, \dots, n_{m+1}$ – odpowiednia ilość elementów nierezzerwowych i rezerwowych o krotność $1, 2, \dots, m$.

Wielkość czasu pracy bezawaryjnej i czasu przywracania zdadności są odrotnie proporcjonalne do λ_k i μ_k .

Prawdopodobieństwo pracy bezawaryjnej w przedziale czasu $(t, \Delta t)$ wynosi:

$$P_k(t, \Delta t) = \frac{\mu_k}{\lambda_k + \mu_k} + \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \mu_k} e^{-(\lambda_k + \mu_k)t} \quad (62)$$

5. Wnioski

Analiza struktury łańcuchów dostaw węgla daje podstawę do traktowania ich jako złożonych systemów obiektów materialnych. Funkcjonowanie takich systemów zależy od wielu czynników, charakteryzujących ich powiązania i wzajemne relacje zarówno z ich poszczególnymi elementami jak i otoczeniem.

Do określenia ich parametrów zaproponowano aparat matematyczny, oparty na pojęciach teorii niezawodności uwzględniający ich specyfikę, tj. przedstawiono metodykę obliczeń dla struktur szeregowych, równoległych i Mieszanych. Pokazano również, że maksymalna czasowa produktywność poszczególnych podsystemów łańcuchów dostaw węgla zależy od wydajności normatywnej centrum podsystemu i uogólnionego współczynnika jego niezawodności, charakteryzującego stopień racjonalności jego struktury.

Ponadto określono zdolność przerobczą podsystemów łańcuchów dostaw węgla jako funkcję ich maksymalnej wydajności i czasu pracy.

LITERATURA

1. Cisowski T.: Ocena niezawodnościowa kolejowych łańcuchów dostaw węgla. Technika Transportu Szynowego, Nr 3/2012, str. 53–56.
2. Kazimierczak J., *Eksploatacja systemów technicznych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
3. Legutko S., *Podstawy eksploatacji maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
4. Niziński S., *Elementy eksploatacji obiektów technicznych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2000.
5. Słowiński B., *Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych*. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 1999.

PROBABILISTIC APPROACH TO COAL SUPPLY CHAINS

Abstract

This paper presents mathematical foundations of the analysis of coal supply chains, based on the concepts of the theory of reliability. The concepts of failure and restoration of function of coal supply chains have been defined. Indices of reliability of coal supply chains have been proposed. Maximum temporal productivity and processing capacity of subsystems of coal supply chains have been determined.

Keywords: Supply chains, reliability theory, reliability index, temporal productivity, processing capacity

ŁAŃCUCHY DOSTAW WĘGLA W UJĘCIU PROBABILISTYCZNYM

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono podstawy matematyczne analizy łańcuchów dostaw węgla, oparte na pojęciach teorii niezawodności. Zdefiniowano pojęcie uszkodzenia i przywrócenia zdolności funkcjonalnej w łańcuchach dostaw węgla. Zaproponowano wskaźniki niezawodności w łańcuchach dostaw węgla. Określono maksymalną czasową produktywność i zdolność przeróbczą podsystemów łańcuchów dostaw węgla.

Słowa kluczowe: Łańcuchy dostaw, teoria niezawodności, wskaźniki niezawodności, czasowa produktywność, zdolność przeróbcza

Prof. dr hab. inż. Tadeusz CISOWSKI
Wydział Transportu i Informatyki
Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie
20-209 Lublin, ul. Mełgiewska 7-9
tel. 81 749 32 43
e-mail: tadeusz.cisowski@wsei.lublin.pl

Mgr inż. Łukasz WOJCIECHOWSKI
Instytut Technologicznych Systemów Informacyjnych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel. 81 5384585
e-mail: l.wojciechowski@pollub.pl

WYDAJNOŚĆ ŁAŃCUCHÓW DOSTAW WĘGLA

1. Łańcuchy dostaw węgla – pojęcie podstawowe

Jak wiadomo łańcuchy dostaw obejmują trzy podstawowe operacje technologiczne: załadunek – przewóz – wyładunek.

Elementem łańcucha dostaw jest mechanizm lub urządzenie, które wykonuje dowolną operację procesu technologicznego. Stopień detalizacji procesu technologicznego związany jest z dokładnością obliczeń, możliwościami wpływu czynników technologicznych i organizacyjnych na czas i technologię operacji oraz możliwościami włączenia lub wyłączenia danej operacji do i z procesu technologicznego.

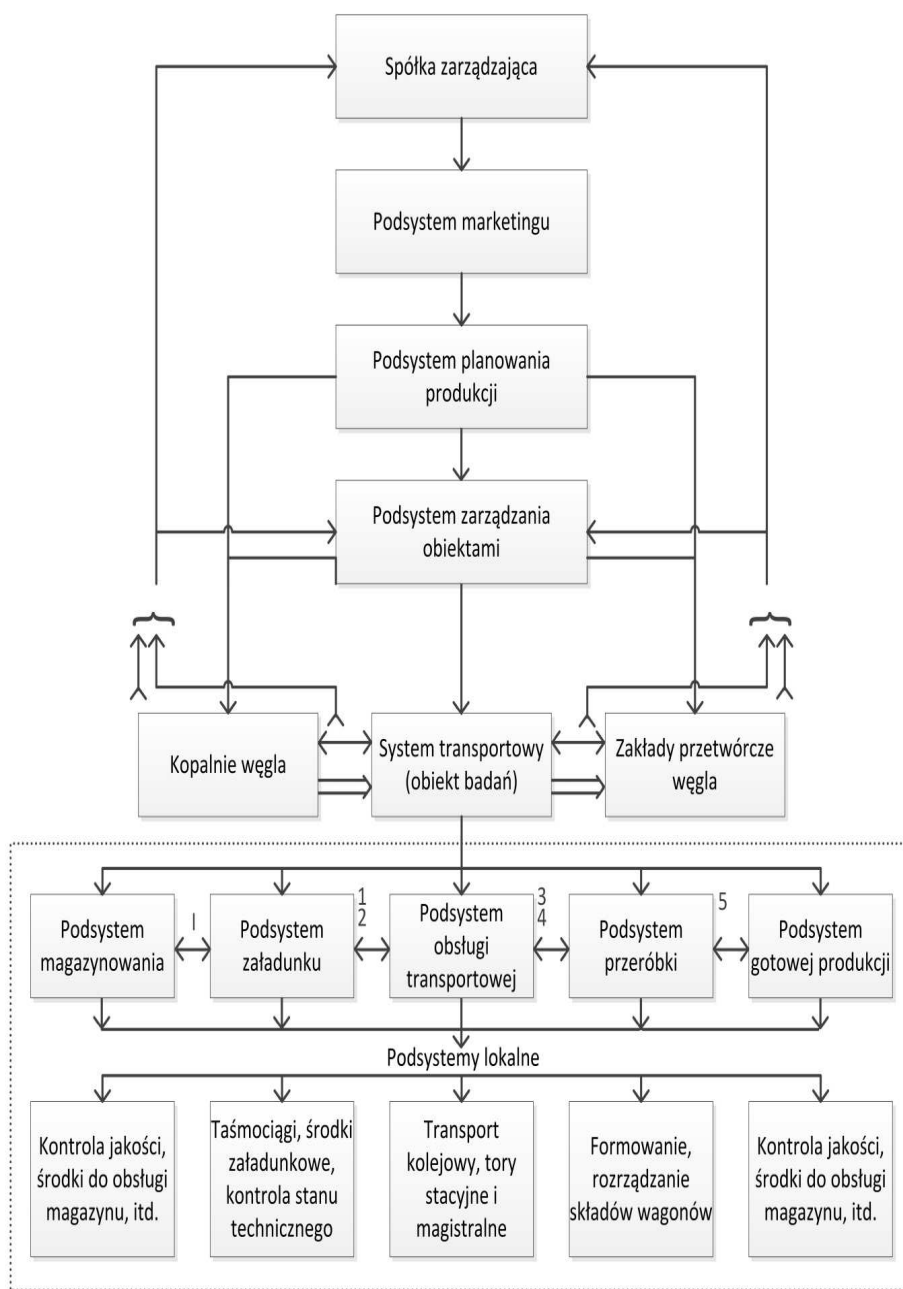
Sformułowane podejście można zastosować w budowie schematu blokowego kolejowego łańcucha dostaw węgla. Detalizacja procesu technologicznego może być odzwierciedlona w analizie i budowie modeli zależności pomiędzy poszczególnymi jego elementami.

W niniejszej pracy rozpatrzono wydajność łańcuchów dostaw węgla, z kopalni do odbiorcy, w trzech aspektach: technicznym, technologicznym i organizacyjnym. Łańcuch dostaw w aspekcie technicznym przedstawiono jako zbiór środków transportu, maszyn, urządzeń i mechanizmów umożliwiający przepływ węgla z kopalni do punktów jego wstępnej przeróbki.

W aspekcie technologicznym i organizacyjnym łańcuch dostaw węgla stanowią wzajemne powiązania i oddziaływania jego elementów w procesie realizacji załadunku i przewozu do odbiorcy.

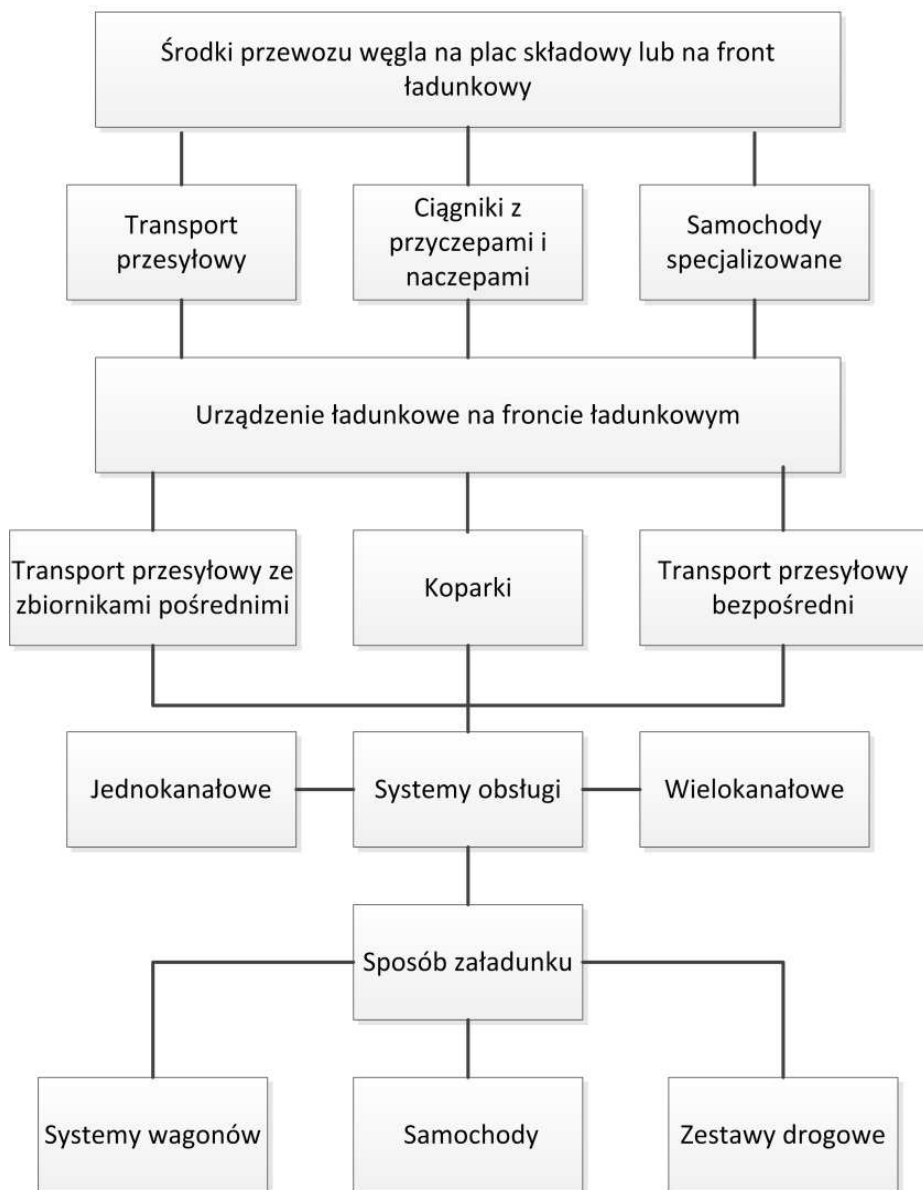
Elementy te to:

- środki transportu (wagony) w procesie i w oczekiwaniu na załadunek;
- fronty ładunkowe z urządzeniami ładunkowymi;
- urządzenia przeładunkowe;
- maszyny i place składowe wraz z wyposażeniem.



Rys. 1. Ogólna struktura systemów załadunku węgla z udziałem transportu kolejowego i samochodowego

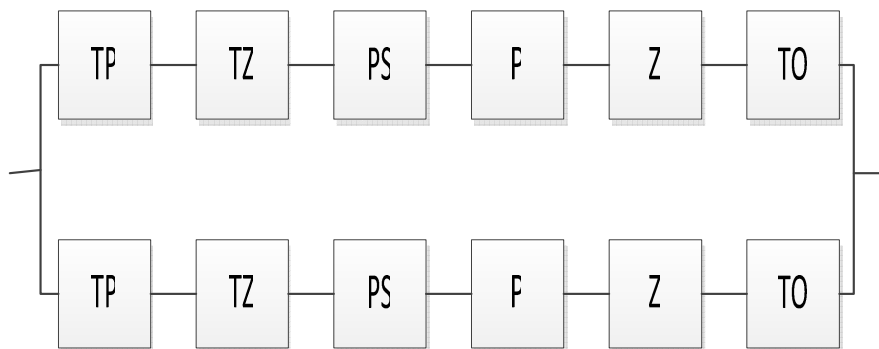
Na rys. 2 pokazano możliwe struktury podsystemów załadunku węgla.



Rys. 2. Ogólna struktura podsystemów załadunku węgla z udziałem transportu kolejowego i samochodowego

Najbardziej rozpowszechnionymi w polskich kopalniach węgla są podsystemy z ładunkiem z zasobników, podsystemy z ładunkiem za pomocą przenośników taśmowych oraz podsystemy z ładunkiem wykorzystujące ładowarki.

W niniejszej pracy rozpatrzono powszechnie występujący podsystem ładunku węgla z zasobników do węglarek, pokazany w postaci schematu blokowego na rysunku 3.



Rys.3. Organizacja ładunku węgla z zasobników do węglarek

Na rysunku 3 przyjęto następujące oznaczenia:

TP – tory przygotowawcze do ładunku;

TZ – tory ładunkowe, nad którymi położone są zasobniki;

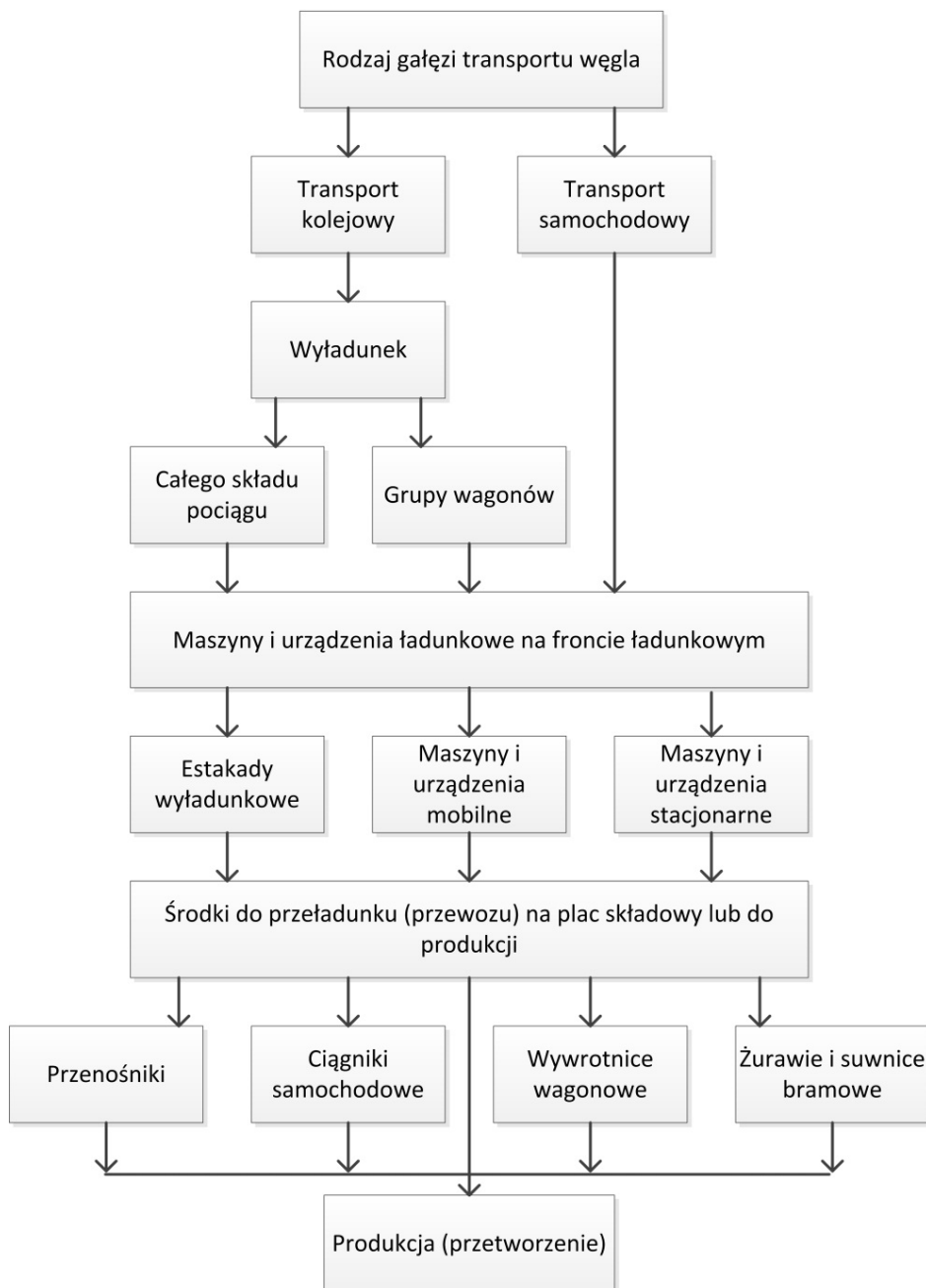
PS – plac składowy;

P – przenośniki;

Z – zasobniki węgla;

TO – tory odjazdowe.

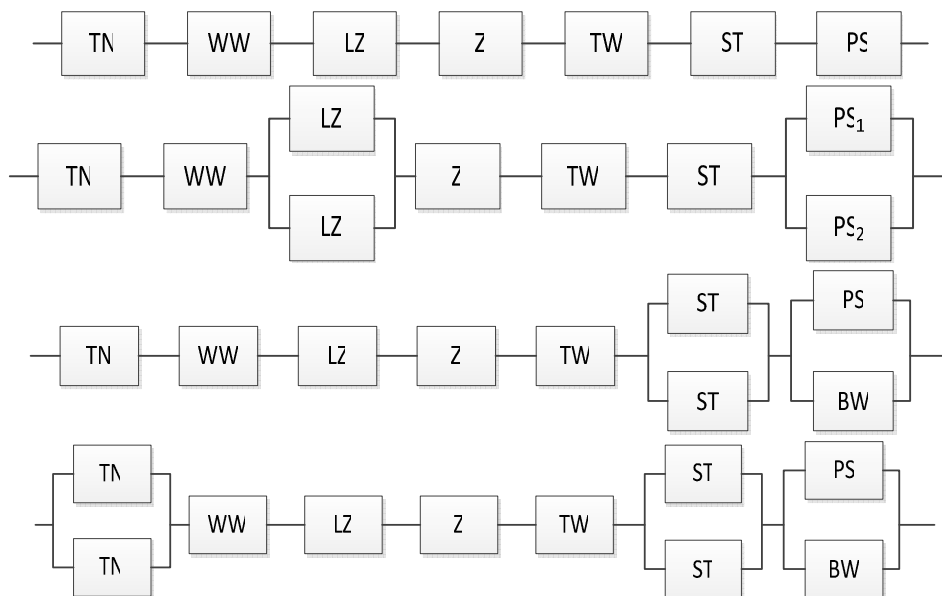
Na rys. 4 pokazano możliwe struktury podsystemów wyładunku węgla.



Rys. 4. Ogólna struktura podsystemów wyładunku węgla

Głównym elementem w kompleksach wyładunku węgla (elektrowniach węglowych) są wywrotnice wagonowe różnych typów oraz estakady wyładunkowe.

Poniżej pokazano kompleksy wyładunkowe węgla ze stacjonarną wywrotnicą wagonową (rysunek 5).



Rys. 5. Warianty schematów blokowych kompleksów wyładunku węgla ze stacjonarną wywrotnicą wagonową

Na rysunku 5 przyjęto następujące oznaczenia:

- TN – tory do napychania wagonów;
- WW – wywrotnica wagonowa;
- LZ – lej zsypowy, który może być wyposażony w urządzenie rozdrabniające węgiel – UR;
- Z – zasobnik węgla;
- TW – tory wyciągowe dla wagonów próżnych, po wyładunku;
- ST – system taśmociągów łączących zasobniki węgla z placami składowymi;
- PS – plac składowy;
- PS₁ – plac składowy otwarty;
- PS₂ – plac składowy zamknięty;
- BW – linia bezpośredniego przemieszczenia węgla do produkcji z pominięciem placu składowego.

Wymagania podstawowe, stawiane łańcuchom dostaw węgla, można rozdzielić na:

- wymagania techniczne – związane z mechanizacją i automatyzacją prac ładunkowych, wraz z przewozem węgla od nadawcy do odbiorcy.
- wymagania technologiczne – dotyczące gotowości węgla do załadunku i przewozu, płynności operacji początkowo-końcowych, bezpieczeństwa ładunku i środków transportu.
- wymagania logistyczne – związane z planowaniem i płynną organizacją dostaw węgla, kontrolą poziomu zapasów, przepływem strumieni informacyjnych.
- wymagania ekonomiczne – dotyczą minimalnych nakładów finansowych przy zapewnieniu realizacji wszystkich podstawowych zadań.

2. Określenie maksymalnej czasowej produktywności podsystemów łańcuchów dostaw węgla

Stopień wykorzystania poszczególnych mechanizmów i urządzeń tworzących łańcuch dostaw zależy od jego struktury i realizowanego procesu technologicznego.

Maksymalna, możliwa produktywność całego systemu określana jest normatywną wydajnością jego głównego elementu (centrum) i współczynnikiem niezawodności, charakteryzującym strukturę i proces technologiczny. Wielkość tę nazywać dalej będziemy maksymalną produktywnością systemu i oznaczać ona będzie maksymalną ilość ton lub wagonów załadowanych (wyładowanych) w jednostce czasu, przy określonym stanie technicznym jego elementów i zadanym procesie technologicznym.

Dla systemu, w którym element główny jest urządzeniem pracującym cyklicznie, produktywność maksymalna określona jest jako funkcja długości cyklu mechanizmu głównego, faktycznej ładowności w czasie cyklu, sposobu obsługi i niezawodności podsystemów, tj.:

$$Q_{TJ} = Z_c \cdot G_f \cdot K_b \quad (1)$$

$$Z_c = \frac{A_f}{t_c} \quad (2)$$

$$G_f = G \cdot \gamma \quad (3)$$

$$A_f = A_p \cdot R_r \quad (4)$$

$$t_c = \sum_{i=1}^k t_i \quad (5)$$

gdzie: Z_c – liczba cykli centrum podsystemu w ciągu godziny, przy obciążeniu równym jedności;
 G_f – faktyczna ładowność centrum podsystemu;
 G – ładowność normatywna centrum podsystemu;
 A_p – czas pracy systemu w ciągu godziny;
 A_f – faktyczny czas pracy urządzenia podstawowego;
 t_c – długość cyklu urządzenia podstawowego;
 t_l – czas poszczególnych operacji centrum podsystemu;
 γ – współczynnik wykorzystania ładowności;
 R_r – współczynnik niezawodności systemu;
 K_b – współczynnik wykorzystania czasu pracy systemu, uwzględniający planowe przerwy (przeglądy techniczne, przerwy zmianowe, itp.).

$$K_b = \frac{A_{pc} - A_n}{A_{pc}} \quad (6)$$

gdzie: A_{pc} – planowy czas pracy systemu w ciągu doby.

Maksymalna produktywność liczona w wagonach w ciągu godziny, w przypadku gdy w cyklu wykonywane są operacje tylko z jednym środkiem transportu jest równa ilości cyklów centrum systemu, tj.:

$$Q_{TL} = \frac{A_p \cdot R_r}{t_c} K_b \quad (7)$$

jeśli w ciągu cyklu obsługuje się h' środków transportu (załadunek grupy wagonów), to:

$$Q_{TL} = \frac{h' \cdot A_p \cdot R_r}{t_c} K_b \quad (8)$$

Z zależności (1) – (8) wynika, że maksymalna godzinowa produktywność podsystemu zależy od normatywnej wydajności jego centrum i jego struktury, którą określa współczynnik niezawodności, tj. produktywność maksymalna określona jest powiązaniem wewnętrznymi w podsystemie.

Dla podsystemów, w których mechanizm podstawowy jest urządzeniem pracującym w sposób ciągły, maksymalna godzinowa produktywność Q_{TJ} jest funkcją obciążenia liniowego i sposobu obsługi, tj.:

$$Q_{Tj} = 3,6 q_m \cdot V \cdot K_b \cdot R_r \quad (9)$$

$$q_m = 1000 F_f \cdot \Delta \quad (10)$$

$$F_f = F \cdot \gamma_p \quad (11)$$

$$q_m = \frac{G}{L_l} \quad (12)$$

gdzie: q_m – obciążenie liniowe maszyny lub urządzenia;
 V – prędkość przemieszczania ładunku;
 F, F_p – odpowiednio teoretyczne i rzeczywiste pole przekroju poprzecznego strumienia ładunku;
 γ_p – współczynnik wykorzystania pola przekroju poprzecznego strumienia ładunku;
 Δ – ciężar objętościowy ładunku;
 G – ciężar jednostki ładunków w opakowaniach;
 L_l – odległość pomiędzy poszczególnymi partiami ładunków.

Eksplatacyjna godzodzinowa produktywność podsystemu Q_{ej} określona jest następującą zależnością:

$$Q_{ej} = Q_{Tj} \cdot P_f \quad (13)$$

lub

$$Q_{ej} = 3,6 q_m \cdot V \cdot K_b \cdot R_f \quad (14)$$

liczoną w tonach na godzinę (t/h).

Jeżeli eksploatacyjna godzinowa produktywność podsystemu liczona jest w jednostkach środków transportu to:

$$Q_{Tj} = \frac{3,6 q_m \cdot V \cdot R_r \cdot K_b}{G_b \cdot \gamma_b} \quad (15)$$

$$i \quad Q_{ej} = \frac{3,6 q_m \cdot V \cdot R_f \cdot K_b}{G_b \cdot \gamma_b} \quad (16)$$

gdzie: G_b – ładowność środka transportu;
 γ_b – współczynnik wykorzystania ładowności środka transportu.

Projektując łańcuchy dostaw należy znać nie tylko produktywność łańcucha istniejącego lub projektowanego, ale również odpowiedź na pytanie odwrotne: jaka powinna być produktywność przy zadanych wielkościach przewozu?

Należy przy tym podkreślić, że w zależnościach (1) – (16) wszystkie wielkości, oprócz R_r , są stałymi i początkowymi dla każdego konkretnego zadania.

Współczynnik niezawodności R_r zależy od składu i struktury podsystemu, normatywnej wydajności i trybu pracy jego elementów. Wielkości Q_{Tj} i Q_{mj} proporcjonalnie zależą od R_r , dlatego w dalszych rozważaniach w charakterze podstawowego miernika struktury podsystemów i całego systemu przyjęto współczynnik niezawodności R_r .

3. Algorytm zdolności przeróbczej łańcuchów dostaw węgla

Pod pojęciem zdolności przeróbczej łańcuchów dostaw węgla będzie rozumiana ilość tono-operacji (wagono-operacji) wykonywana w jednostce czasu. Jeżeli w łańcuchu dostaw wykonywana jest tylko jedna operacja z ładunkiem (środkiem transportu) to zdolność przeróbcza równa jest jego produktywności. Współczesne łańcuchy dostaw są modułami wielooperacyjnymi. Cecha ta, z jednej strony wymaga łączenia produktywności urządzeń i mechanizmów w poszczególnych operacjach, zaś z drugiej strony narzuca stosowanie odpowiednich mierników oceny efektywności ich pracy. Miernikiem określającym celowość łączenia operacji w jednym module jest miernik zdolności przepływowej towarów, wyrażony w tono-operacjach na godzinę (lub wagono-operacjach na godzinę). Stopień celowości łączenia operacji technologicznych w systemie będzie określony miernikiem zdolności przepływowej w różnych wariantach obsługi ładunku i środka transportu.

Zdolność przepływowa P_{Tj} zależy od maksymalnej wydajności i liczby operacji M wykonywanych z ładunkiem i środkiem transportu:

$$P_{Tj} = \frac{h \cdot \lambda_n \cdot M}{\sum_l t_l + t_t} \quad (17)$$

gdzie: h – ilość środków transportu na froncie ładunkowym;

λ_n – intensywność zgłoszeń środków transportu na front ładunkowy;

M – ilość operacji technologicznych w podsystemie;

$\sum_l t_l$ – czas operacji procesu technologicznego, związanych

z przygotowaniem i zakończeniem załadunku lub wyładunku środka transportu;

t_t – czas załadunku lub wyładunku środka transportu.

- dla podsystemów jednokanałowych:

$$t_k = \frac{h \cdot \lambda}{Q_{Tj}} = \frac{h \cdot \lambda}{Z \cdot R_r \cdot K_b} \quad (18)$$

- dla podsystemów wielokanałowych w pełni dostępnych:

$$t_k = \frac{h \cdot \lambda}{X \cdot Z \cdot R_r \cdot K_b} \quad (19)$$

gdzie: X – ilość maszyn i urządzeń ładunkowych w podsystemie.

Przy losowym strumieniu zgłoszeń ładunku i środków transportu do systemu czas operacji związanych z przygotowaniem i zakończeniem załadunku lub wyładunku środka transportu powinien być zwiększony o czas oczekiwania na te operacje, określany metodami teorii obsługi masowej lub modelowania symulacyjnego.

4. Wnioski

Analiza struktury łańcuchów dostaw węgla daje podstawę do traktowania ich jako złożonych systemów obiektów materialnych. Funkcjonowanie takich systemów zależy od wielu czynników, charakteryzujących ich powiązania i wzajemne relacje zarówno z ich poszczególnymi elementami jak i otoczeniem.

Do określenia ich parametrów zaproponowano aparat matematyczny, oparty na pojęciach teorii niezawodności uwzględniający ich specyfikę, tj. przedstawiono metodykę obliczeń dla struktur szeregowych, równoległych i mieszanych. Pokazano również, że maksymalna czasowa produktywność poszczególnych podsystemów łańcuchów dostaw węgla zależy od wydajności normatywnej centrum podsystemu i uogólnionego współczynnika jego niezawodności, charakteryzującego stopień racjonalności jego struktury. Ponadto określono zdolność przeróbczą podsystemów łańcuchów dostaw węgla jako funkcję ich maksymalnej wydajności i czasu pracy.

LITERATURA

1. Cisowski T.: Ocena niezawodnościowa kolejowych łańcuchów dostaw węgla. Technika Transportu Szynowego, Nr 3/2012, str. 53–56.
2. Kazimierzczak J., Eksploatacja systemów technicznych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
3. Legutko S., Podstawy eksploatacji maszyn. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1999.
4. Niziński S., Elementy eksploatacji obiektów technicznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2000.
5. Słowiński B., Podstawy badań i oceny niezawodności obiektów technicznych. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 1999.

EFFICIENCY OF COAL SUPPLY CHAINS

Abstract

The present work analyses reliability indices of coal supply chains. Maximum temporal productivity and processing capacity of subsystems of coal supply chains have been determined.

Keywords: Logistics, transport, supply chains, temporal productivity, processing capacity

WYDAJNOŚĆ ŁAŃCUCHÓW DOSTAW WĘGLA

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono wskaźniki niezawodności w łańcuchach dostaw węgla. Określono maksymalną czasową produktywność i zdolność przeróbczą podsystemów łańcuchów dostaw węgla.

Słowa kluczowe: Logistyka, transport, łańcuchy dostaw, czasowa produktywność, zdolność przeróbcza

Prof. dr hab. inż. Tadeusz CISOWSKI
Wydział Transportu i Informatyki
Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie
20-209 Lublin, ul. Mełgiewska 7-9
tel. 81 749 32 43
e-mail: tadeusz.cisowski@wsei.lublin.pl

Mgr inż. Łukasz WOJCIECHOWSKI
Instytut Technologicznych Systemów Informatycznych
Wydział Mechaniczny
Politechnika Lubelska
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36
tel. 81 5384585
e-mail: l.wojciechowski@pollub.pl