

Dr hab. inż. Jan Duda Prof. PK ;
Politechnika Krakowska Wydział Mechaniczny;
Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji ;
duda@mech.pk.edu.pl;

Modelowanie komputerowo zintegrowanego rozwoju procesów i systemów montażowych

Streszczenie:

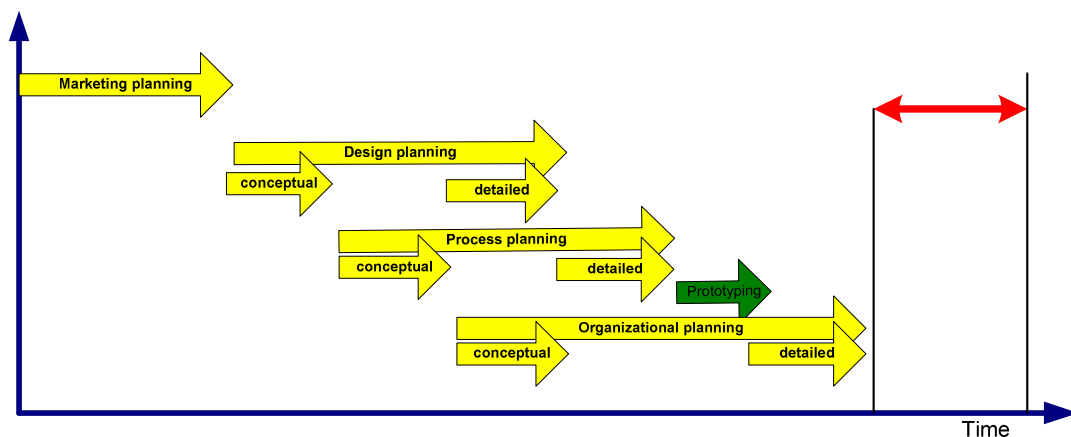
Abstract. The paper presents the trends in the development of methods and systems for assembly process planning on the background of Concurrent Engineering strategies. The solutions for the functional integration of manufacturing and production preparation phases and the IT infrastructure including PDM systems for the storage of product data, design and manufacturing process documentation are presented. The concept and the example of integrated process and assembly system planning in PLM (Product Lifecycle Management) environment are presented. The example of the implementation of product development process using BPMN notation are also discussed.

1. Introduction

Rozwój wyrobu zgodnie z nowymi strategiami rozwojowymi kładzie nacisk na wykonanie wszystkich niezbędnych faz w cyklu życia wyrobu możliwie równocześnie CE (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 przyśpieszenie realizacji zamówień.

2. Zintegrowany rozwój procesu i system montażu

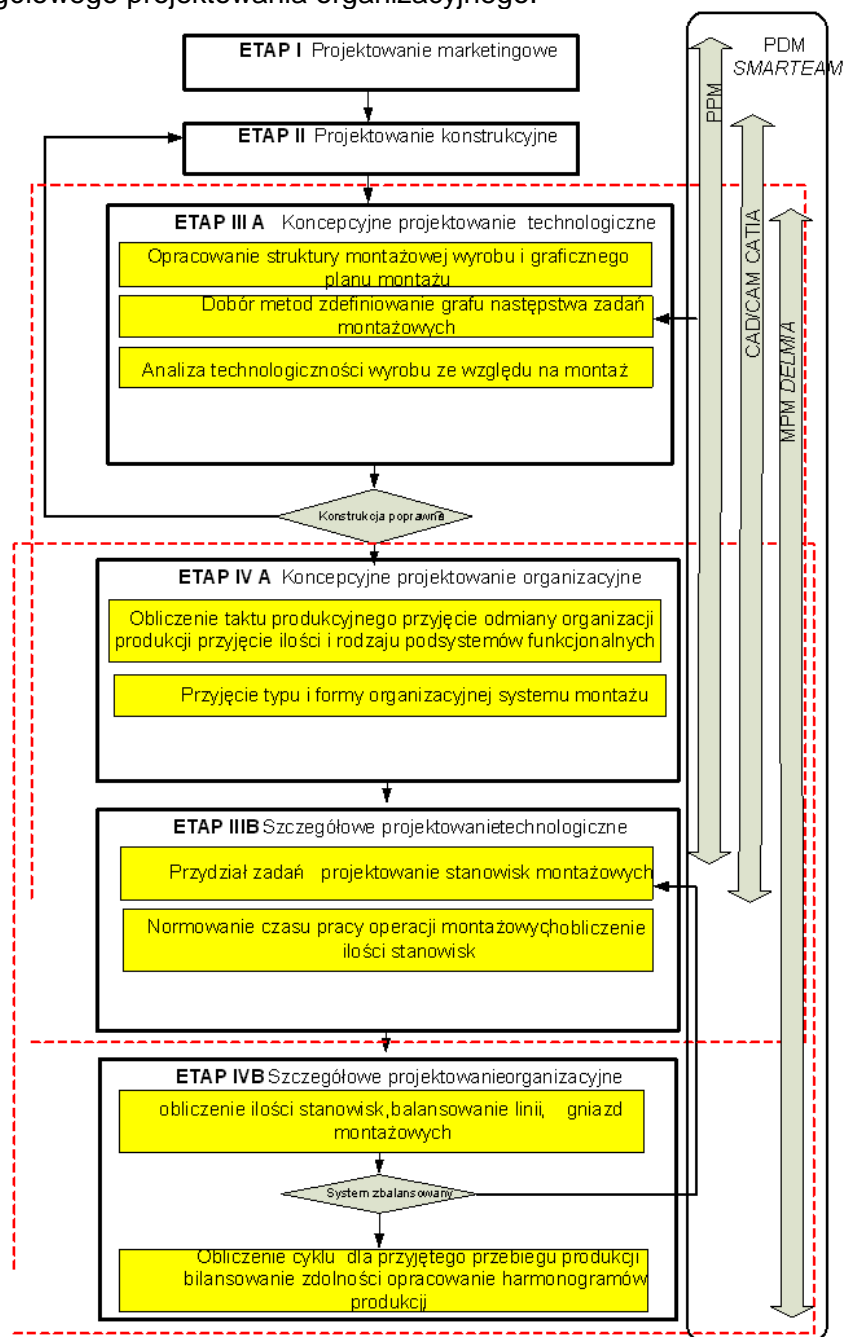
Postęp umożliwiający realizację omawianych strategii rozwojowych w projektowaniu procesów i systemów wytwarzania wskazuje na konieczność integracji realizacji faz rozwojowych wyrobu. Cechy nowoczesnych strategii rozwoju wskazują na potrzebę integracji faz rozwoju wyrobów. Integracja i równoległe wykonywanie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



Rys.1 Równoległa realizacja faz rozwojowych

Integracja projektowania procesu i systemu montażowego wskazuje na konieczność wyodrębnienia faz rys.2:

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



Rys.2 Zintegrowana realizacja faz projektowania technologiczno-organizacyjnego procesu i systemu montażowego

Zintegrowane projektowanie procesu i systemu montażu zrealizowano w środowisku PLM. Środowisko PLM tworzy zestaw aplikacji wspomagających rozwój wyrobu w którego skład wchodzi:

- zarządzanie wyrobem i portfelem zamówień PPM (Product and Portfolio Management),
- projektowania wyrobów i procesów wytwarzania CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing),
- zarządzania procesem wytwarzania MPM (Manufacturing Process Management),
- zarządzanie danymi wyrobu PDM (Product Data Management).

Weryfikację zaproponowanej koncepcji przeprowadzono z wykorzystaniem wdrożonych w ITMiAP pakietów CATIA i DELMIA w zakresie rozwoju procesu i systemu montażowego reduktora [9]. Zakres testów obejmował:

- tworzenie cyfrowego modelu wyrobu w systemie PLM CATIA na podstawie opracowanej struktury montażowej wyrobu i graficznego planu montażu,
- przeprowadzenie obliczeń organizacyjnych, obliczenie taktu produkcji, określenie minimalnej liczby stanowisk montażowych w oparciu o uzyskane w analizie DFA szacunkowe czasy zadań montażowych,
- przydział zadań montażowych oraz przyjęcie formy organizacyjnej linii montażowej oraz liczby i rodzaju niezbędnych podsystemów funkcjonalnych;
- tworzenie koncepcji systemu montażowego - linii montażowej w środowisku cyfrowego modelowania PLM DELMIA, zdefiniowanie biblioteki procesu i systemu technologicznego montażu.

2.1. Koncepcyjne projektowanie procesu technologicznego montażu

Postać konstrukcyjna wyrobu jest podstawą do określenia struktury montażowej SM wyrobu.

$$SM = \{JM_M\{JM_{M-1}\{JM_{M-2} \dots JM_1\}\}\}$$

gdzie:

M - poziom dekompozycji wyrobu na jednostki montażowe,

$JM_M, JM_{M-1}, JM_{M-2}, JM_1$ -jednostki montażowe zespoły montażowe M -tego poziomu dekompozycji.

Pomiędzy jednostkami montażowymi definiowane są więzi, które warunkują osiągnięcie narzuconych przez konstruktora więzi topologicznych, wymiarowych oraz dokładności położenia. Tak więc postać montażową wyrobu można opisać za pomocą trójki:

$$WRM = \langle SM, WM, \beta \rangle$$

gdzie:

SM - struktura montażowa wyrobu,

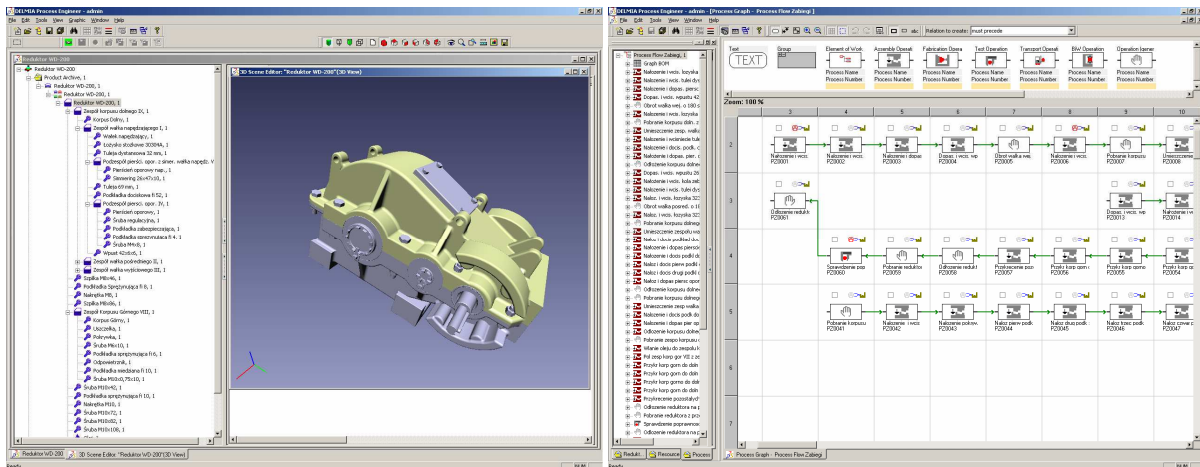
WM – zbiór więzi montażowych,

β -odwzorowanie na zbiorze jednostek montażowych.

$$\beta: JM \times JM \rightarrow WM$$

Struktura montażowa wyrobu odwzorowana w formie cyfrowej w systemie CAD jest podstawą do przeprowadzenia symulacji złożenia projektowanej konstrukcji. Jest też podstawą tworzenia sekwencji montażowej. Sekwencja montażowa określa ona kolejność łączenia jednostek montażowych (listę kolejno wykonywanych zadań montażowych) prowadzącą do otrzymania gotowego wyrobu. Większość ze stosowanych sposobów przedstawiania sekwencji montażowej to metody *explicite*, będące wyraźnym odwzorowaniem zadań montażowych w metodę ich reprezentacji. Na etapie koncepcyjnego projektowania zastosowane zostaną metody *implicite*, które narzucają jedynie warunki jakie muszą być spełnione przez sekwencję zadań montażowych.

Ustalona sekwencją kolejność łączenia jednostek montażowych ujęta w formie graficznego planu montażu, określającej kolejność łączenia jednostek montażowych do ustalonych jednostek bazowych jest podstawą do zdefiniowania zadań montażowych.



Rys.3 Struktura montażowa wyrobu odwzorowana w formie cyfrowej i graf następstwa realizacji zadań montażowych

Na zbiorze zadań montażowych zbudować można graf ograniczeń kolejnościowych GOK:

$$GOK_K = \langle ZM, RK, \mu \rangle$$

Gdzie:

ZM - zbiór zadań montażowych,

RK- relacja kolejnościowa na zbiorze zadań montażowych,

μ - odwzorowanie na zbiorze zadań montażowych

$$\mu: ZM \times ZM \rightarrow RK$$

Relację kolejnościową przestawić można w postaci macierzy:

$$rk_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{gdy zadanie } i \text{ poprzedza zadanie } j \\ 0 & \text{w przeciwnym wypadku} \end{cases}$$

Na podstawie opracowanego planu montażu przeprowadzić można analizę technologiczności montażowej wyrobu. Analiza technologiczności konstrukcji ze względu na montaż przy pomocy metodologii DFA polega na badaniu każdej części pod względem jej niezbędności w zapewnieniu funkcjonalności całego wyrobu. Zastosowanie analizy DFA pozwala na określenie teoretycznie minimalnej liczby części składowych. Istotną częścią analizy konstrukcji jest ocena czasu montażu projektowanego wyrobu i określenie miernika efektywności procesu montażu, w odniesieniu do problemów związanych z montażem. DFA klasyfikuje stopień trudności działań montażowych i na tej podstawie określa standardowy czas wykonania wszystkich operacji montażowych T_i . Czas określany przez metodologię DFA wynika z klasyfikacji tych cech konstrukcyjnych, które wpływają na przebieg zadań montażowych. Na tym etapie projektowania można oszacować całkowity czas montażu zaprojektowanego wyrobu:

$$T_a = \sum_{i=1}^n T_i$$

W wyniku kolejnych iteracji otrzymujemy postać konstrukcyjną i adekwatną listę zadań montażowych ujętych w formie ograniczeń kolejnościowych oraz szacunkowe czasy ich trwania. Graf ograniczeń kolejnościowych reprezentuje dopuszczalne warianty wykonania montażu wyrobu.

2.2 Konceptyjne projektowanie organizacyjne systemu montażu

W zakresie konceptyjnego projektowania organizacyjnego przeprowadzane jest określenie liczby stanowisk montażowych, przyjęcie liczby i rodzaju podsystemów funkcjonalnych systemu montażu dla planowanej wielkości produkcji. Ustalona ilość i rodzaj podsystemów funkcjonalnych jest podstawą do przeprowadzenia wstępnych rozwiązań organizacyjnych w obrębie wyodrębnionych podsystemów. Danymi wejściowymi do obliczenia taktu produkcji są: wymagana wielkość produkcji P , oraz dopuszczalny czas produkcji T_p .

$$T_s = \frac{T_p}{P}$$

Z fazy konceptyjnego projektowania procesu montażu mamy:

- informacje o wszystkich zadaniach, które muszą być wykonane w ramach procesu,

$$ZM = \{ZM_i\}, i = 1, 2, \dots, n$$

- czasy realizacji zadań montażowych T_i ,
- relacje kolejnościową,

$$RK[rk_{i,j}]_{n \times n}, \quad i, j = 1 \dots n$$

- całkowity czas wykonywania wszystkich zadań.

W oparciu o powyższe dane można obliczyć teoretycznie minimalną ilość stanowisk montażowych z zależności:

$$LS_{min} = \sum_{i=1}^n T_i$$

gdzie

T_i – czas potrzebny na wykonanie i -tego zadania,

n – ilość zadań montażowych.

Uwzględniając relację kolejnościową RK narzuconą na zbiór zadań montażowych można dokonać wstępnego przydziału zadań montażowych do stanowisk. W tym celu należy wszystkie zadania montażowe ZM pogrupować w takie ZM_m podzbiory, aby tworzyły one operacje montażowe realizowane na stanowiskach pracy linii montażowej. Wymagane jest spełnienie postulatu kompletności montażu:

$$\bigcup_{m=1}^{MS} ZM_m = ZM$$

gdzie: MS - ilość stanowisk (operacji) montażowych

Ważne jest także, aby żadne zadanie montażowe nie należało do dwóch różnych podzbiorów, gdyż nie można wykonywać tego samego zadania montażowego na dwóch stanowiskach, tzn.:

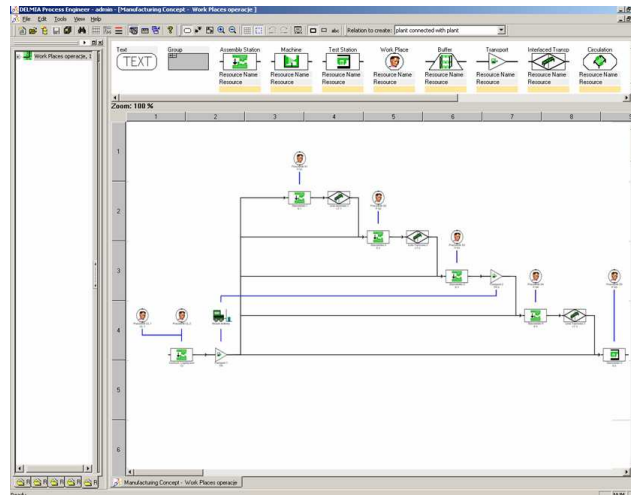
$$ZM_\mu \neq ZM_m$$

W przypadku gdy prędkość wykonywanych zadań montażowych jest większa od taktu średniego, dla zsynchronizowania potoku należy w miejscach, umieścić równoległe kilka stanowisk pracy. Liczbę tych stanowisk pracy uzyskuje się dzieląc prędkość poszczególnych operacji przez wartość średniego taktu linii potokowej i zaokrąglając wynik do pełnych jednostek.

$$L_{Sm} = \frac{T_i}{T_s}$$

gdzie: L_{Sm} – liczba stanowisk planowanych do realizacji m -tej operacji

W dalszej kolejności następuje określenie rozmieszczenia i połączenia ustalonej liczby stanowisk montażowych w system montażowy i wyodrębnienie podsystemów funkcjonalnych transportu magazynowania i kontroli. Efektem powyższych działań jest projekt koncepcyjny systemu montażowego, który umożliwia realizację fazy szczegółowego projektowania technologicznego.



Rys.4 Fragment koncepcji systemu montażowego

2.3 Szczegółowe projektowanie technologiczne

Działania projektowe realizowane w fazie szczegółowego projektowania technologicznego ujmują szereg działań projektowych prowadzących do przyjęcia szczegółowych rozwiązań technicznych. W zakresie projektowania operacji procesu technologicznego montażu obejmują:

- dobór i projektowanie urządzeń montażowych oraz wyposażenia technologicznego montażowego przedmiotowego i narzędziowego,
- określenie struktury operacji montażowych, zabiegów i czynności montażowych,
- opracowanie programów sterujących urządzeniami montażowymi robotów manipulatorów,
- opracowania kart instrukcyjnych operacji montażu.

W zakresie projektowania operacji transportu między-stanowiskowego działania obejmują:

- dobór i projektowanie urządzeń transportowych,
- opracowanie programów sterujących urządzeniami transportowych.

W zakresie projektowania operacji kontroli działania obejmują:

- dobór i projektowanie urządzeń kontroli,
- opracowanie programów sterujących urządzeniami transportowych,
- opracowania kart instrukcyjnych operacji kontroli.

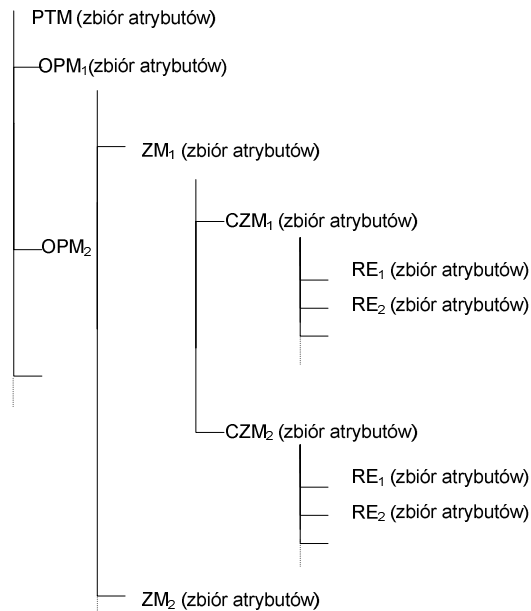
Wynikiem projektowania proces technologiczny montażu realizowany przez system montażu jest opisany przez zbiór działań $\{E_M\}$, realizowanych przez elementy systemu montażu, w wyniku których następuje łączenie części w jednostki montażowe wyższych rzędów.

$$PTM = \{E_{TRM}, E_{OPM}, E_{IDM}\}, SPM$$

gdzie:

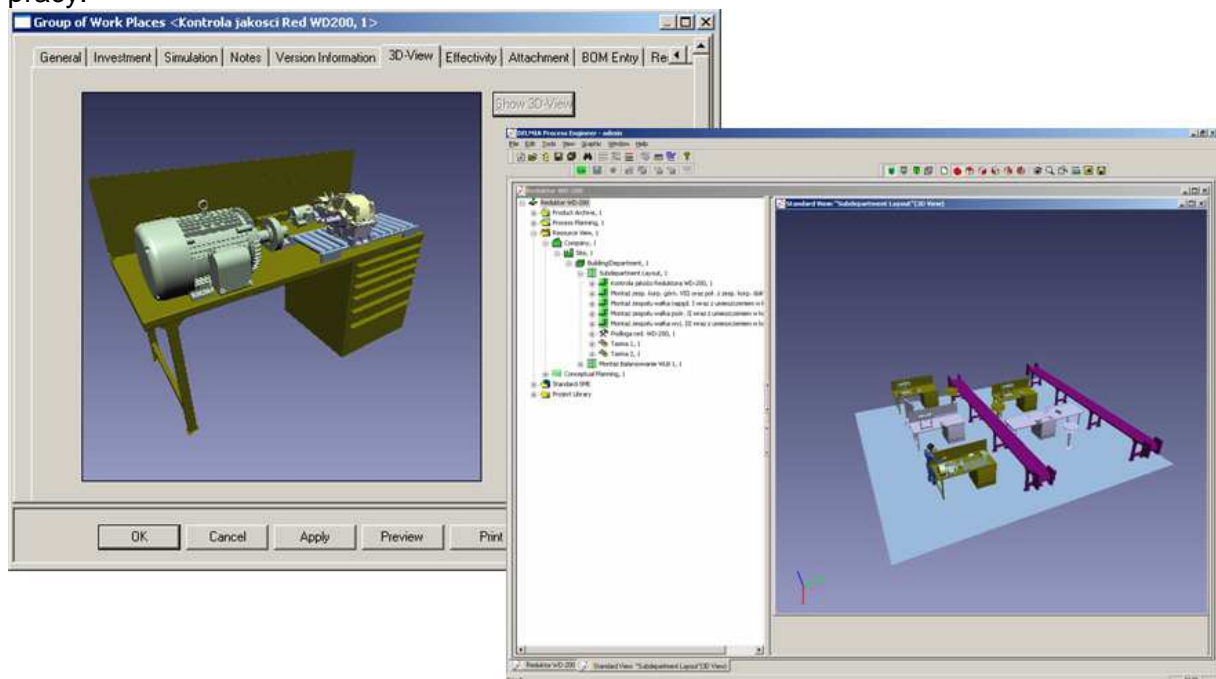
E_{TRM} -działań technologicznych montażu powodujących uzyskanie połączenia części,
 E_{OPM} -działań powodujących zmianę położenia obiektu w systemie (narzędzi montażowych, jednostek montażowych JM_M , oprzyrządowania montażowego,

E_{IDM} -działań kontrolnych poprawności wykonania zadań montażowych w odniesieniu do charakterystyk zadanych dokumentacją procesu.
 SPM – struktura procesu technologicznego montażu.



$$PTM = [Operacja\ montażowa[Zabieg\ montażowy[Czynność\ montażowa[Ruch\ elementarny]]]]$$

Bazując na powyższym procesie tworzony jest cyfrowy model systemu montażu i stanowisk pracy.

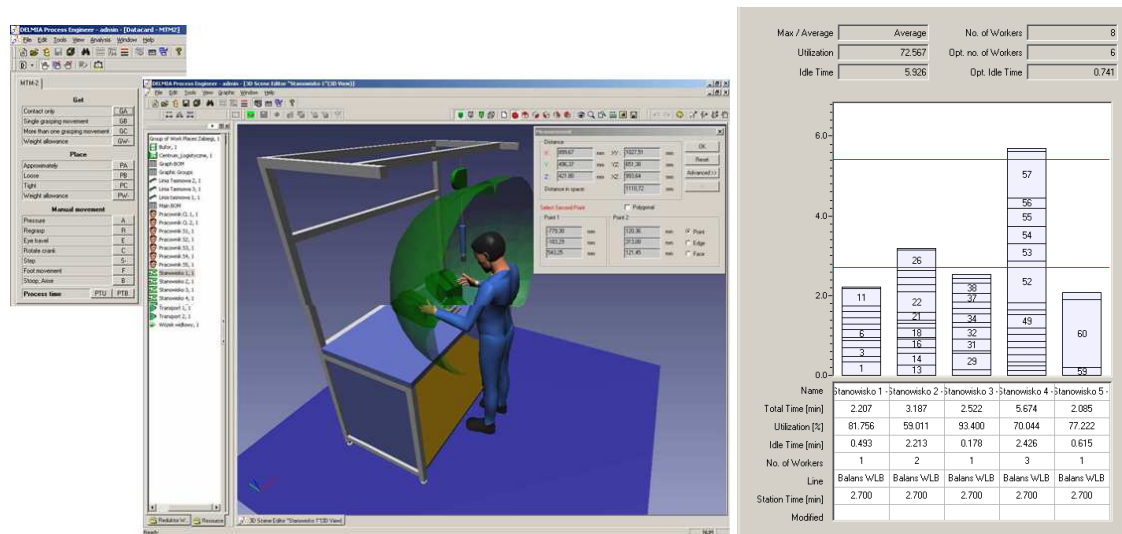


Rys. 5 Model cyfrowy systemu montażowego

2.4 Szczegółowe projektowanie organizacyjne

Ustalony PTM jest są podstawą wyboru wariantu organizacyjnego stanowiska wytwarzania i podstawą realizacji fazy szczegółowego projektowania organizacyjnego.

Dane niezbędne do obliczeń szczegółowych organizacji produkcji oraz kalkulacji czasu trwania działań montażowych są pobierane z cyfrowego modelu systemu. Czasy trwania działań montażowych zostały określone przy użyciu metod MTM (Rys.6).



Rys.6 Kalkulacja czasów działań montażowych i balansowanie linii

Wybrana struktura procesu montażu oraz ustalone czasy trwania zadań montażowych tworzące operacje podlegają synchronizacji w projektowanym podsystemie montażowym, która jest zależna od przyjętej formy organizacji produkcji. Na liniach produkcyjnych kroki te obejmują przeliczanie liczby stanowisk i bilansowanie linii.

Dany jest zbiór zadań montażowych wstępnie przypisanych do stanowisk montażowych:

$$ZM = \bigcup_{m=1}^{MS} ZM_m$$

z ustalonymi w wyniku szczegółowego projektowania technologicznego czasami T_i wykonywania zadań montażowych realizowanych na stanowisku podane w wektorze:

$$T = [T_i], i = 1, 2 \dots n$$

Dany jest także cykl linii montażowej, który spełnia warunek:

$$\bigwedge_{1 \leq i \leq n} \max T_i \leq T_c \leq \sum_{i=1}^n T_i$$

oraz ograniczenie czasowe:

$$\bigvee_{1 \geq m \leq M} \sum_{ZM_i \in ZM} T_i \leq T_c$$

Problem projektowy polega na ponownym przydzieleniu zadań do stanowisk z uwzględnieniem ograniczeń kolejnościowych tak aby optymalny balans linii montażowej spełniał kryterium minimalizacji niewykorzystanego czasu pracy:

$$Q = \sum_{m=1}^{MS} (c - \sum_{ZM_i \in ZM} T_i) \rightarrow \min$$

gdzie:

MS – zbiór stanowisk montażowych,

ZM_m - podzbiór zadań montażowych tworzących stanowiska pracy.

Można zauważyć, iż minimalizacja nie wykorzystanego czasu pracy równoważona jest minimalizacją liczby stanowisk pracy na linii montażowej. Ze sformułowania problemu wynika, że balansowanie linii montażowej jest to wieloetapowy proces decyzyjny, które polega na

alokacji określonego dopuszczalnego zbioru zadań montażowych do stanowisk pracy na linii montażowej w określonych dyskretnych chwilach czasu, zwanych cyklem montażu, z uwzględnieniem relacji kolejnościowych. Tak przedstawiony problem jest procesem dynamicznym rozwijającym się w czasie. Liczba dopuszczalnych podzbiorów zadań montażowych, utworzonych na danym etapie decyzyjnym doskonalenia projektowanego systemu montażu, spełniających ograniczenia kolejnościowe, zależy od czasów T_i wykonywania zadań montażowych oraz długości cyklu T_c .

Zmiana alokacji zadań do stanowisk montażowych skutkuje koniecznością przeprojektowania stanowisk montażowych i ponownego wyznaczenia czasów zadań montażowych. W kolejnych iteracjach następuje doskonalenie systemu montażowego. Wynikiem etapu szczegółowego projektowania organizacyjnego jest cyfrowy model systemu produkcyjnego łączącego wszystkie elementy systemu montażowego z planem procesu montażu przechowywane w bibliotece i harmonogram procesu. Dalsze badania na modelu symulacyjnym są wykorzystywane do analizy i doskonalenia systemu.

3. Modelowanie i implementacja procesu rozwoju procesu i systemu montażu w notacji BPMN

Do modelowania rozwoju wyrobu zgodnie z nowymi strategiami rozwojowymi zastosowano notację modelowania procesów biznesowych BPMN (Business Process Modeling Notation). Notacja ta reprezentowana jest przez język BPML (Business Process Modeling Language), który traktowany jest jako narzędzie do jednolitego opisu strategii biznesowych partnerów na poziomie zarówno lokalnym, jak i globalnym. Na podstawie diagramu utworzonego w notacji BPMN generowany jest kod źródłowy w formacie XML programu zarządzającego [4].

Notacji BPMN umożliwia definiowanie procesów realizowanych w organizacji poprzez wykorzystanie tzw. basenów (SwimLanes) oraz ról biznesowych (pool) pozwalających na grupowanie procesów i czynności wykonywanych przez jednostkę organizacji oraz graficzne przedstawienie, które z procesów będą wykonywane przez konkretne osoby. W ten sposób możliwe jest również modelowanie wymiany informacji pomiędzy kooperującymi ze sobą podmiotami.

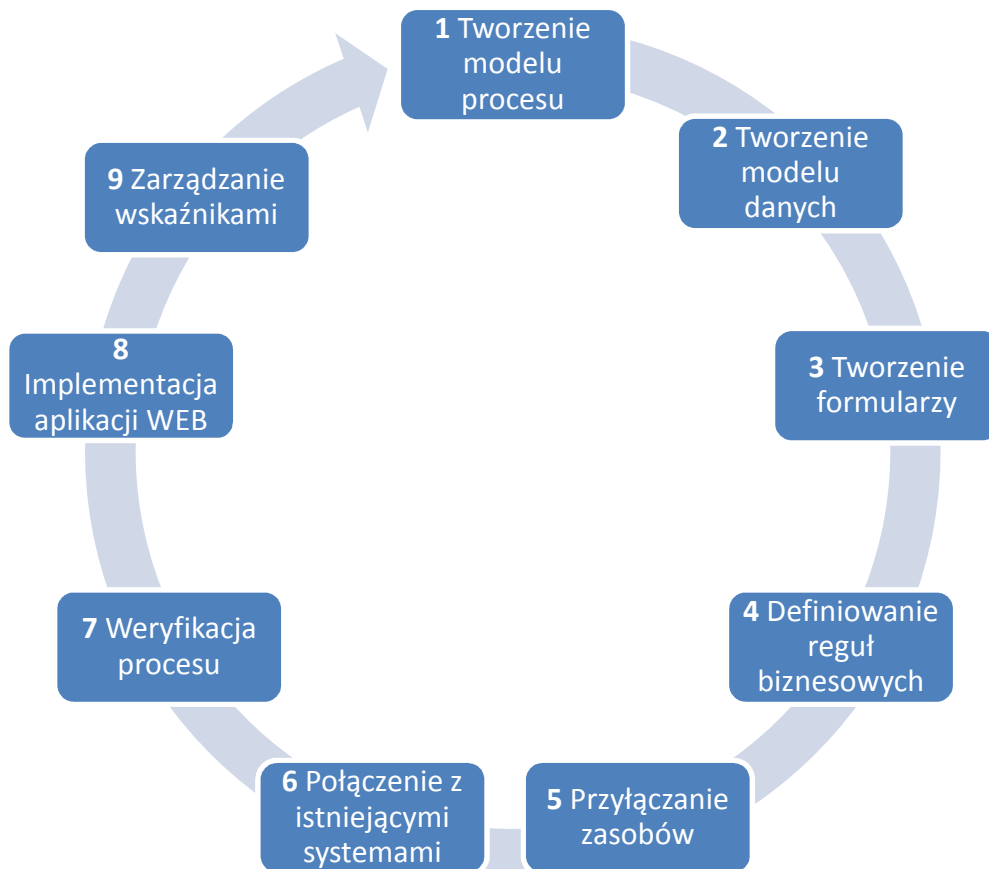
Implementacji procesu dokonano w systemie Bizagi [2],[3],[8], który pozwala na wizualizację, kontrolę i edycję procesów w czasie rzeczywistym. Składa się z dwóch aplikacji:

- BizAgi Process Modeler: tworzenie diagramów i dokumentacji procesów,
- BizAgi BPM Suite: tworzenie na podstawie diagramów działających aplikacji.

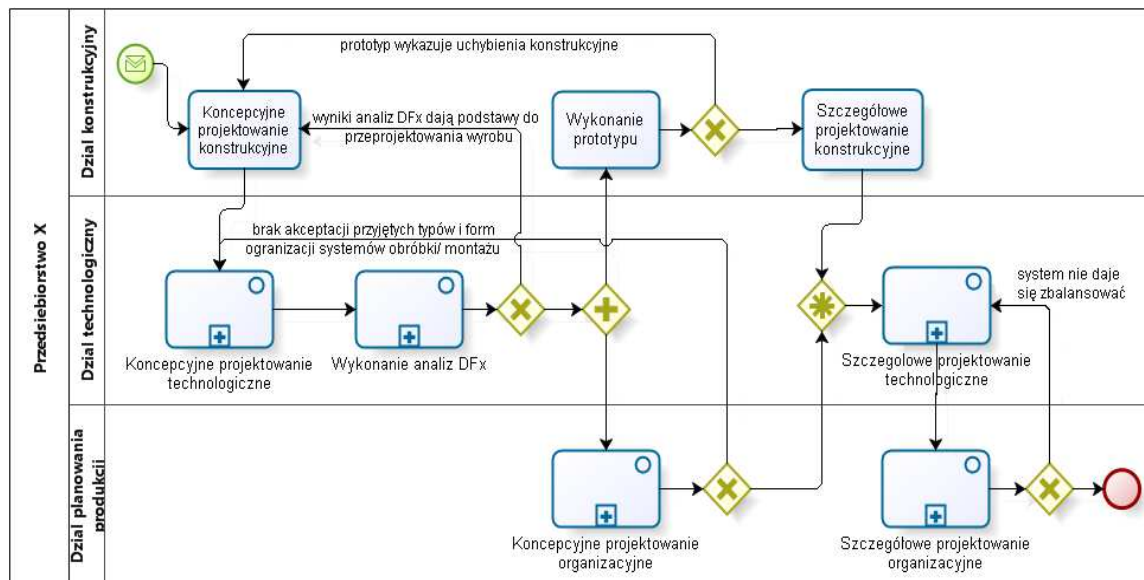
Kolejne etapy projektowania aplikacji są następujące (rys. 7):

- tworzenie modelu procesu,
- tworzenie modelu danych,
- tworzenie formularzy,
- definiowanie reguł biznesowych, przyłączenie zasobów,
- połączenie z istniejącymi systemami,
- weryfikacja procesu,
- implementacja aplikacji internetowej.

Struktura procesu definiowana jest w postaci diagramów BPMN z wykorzystaniem symboli i określeń, a zasady realizacji zadań za pomocą reguł. Zastosowanie omawianej notacji do modelowania procesów rozwoju wyrobów omówiono w pracy [7]. Zależności funkcyjne pomiędzy poszczególnymi fazami przygotowania produkcji zostały pokazane przy użyciu notacji BPMN (rys. 8). Opracowany model został rozwinięty w zakresie projektowania procesu i systemu montażu a następnie podjęto próbę jego implementacji poprzez: utworzenie modelu danych i formularzy, zdefiniowanie reguł biznesowych i grup użytkowników oraz integrację z zewnętrznymi danymi.



Rys. 7 Etapy projektowania aplikacji



Rys. 8. Model ogólny procesu przygotowania produkcji wykonany w notacji BPMN przy użyciu oprogramowania BizAgi Process Modeler[7]

3. Podsumowanie

Rozwój zintegrowanych systemów rozwoju wyrobu ewoluuje w kierunku rozwiązań, które w coraz szerszym zakresie stosują mechanizmy gromadzenia i wykorzystywania zdobywanej w wyniku doświadczeń specjalistycznej wiedzy.

Zaproponowany przebieg współbieżnego projektowania procesu i systemu montażu został zrealizowany w środowisku cyfrowego modelowania a następnie opisany w notacji BPMN i implementowany w środowisku Bizagi BPMN Suite. Zastosowane podejście ułatwia budowę aplikacji wspomagającej realizację procesów projektowych i decyzyjnych w technologiczno organizacyjnym przygotowaniu produkcji.

4. Literatura

1. Adam O., Hofer A., Zang S., Hammer C. i inni.: A Collaboration Framework For Cross-Enterprise Business Process Management, http://interop-esa05.unige.ch/INTEROP/Proceedings/Industrial/IND1_Adam.pdf
2. BPMN - Business Process Modeling Notation. Bizagi Process Modeler, Copyright © 2011 - bizagi, document URL: <http://www.bizagi.com/docs/BPMNbyExampleENG.pdf>, [data dostępu: 23.02.2011].
3. Business Process Model and Notation, V1.1, Copyright © 2004, 2006, 2008, Object Management Group OMG Document Number: formal/2008-01-17, document URL: <http://www.omg.org/spec/BPMN/1.1/PDF>, [data dostępu: 23.02.2011]
4. Biernacki P.: Dlaczego BPMN? – Podstawy modelowania, Konf. Production Engineering, Politechnika Wroclawska, Wrocław, 2006 s.123-132
5. Duda J.: Wspomagane komputerowo generowanie procesu obróbki w technologii mechanicznej. Seria Mechanika, Monografia 286, Politechnika Krakowska Kraków 2003.
6. Duda J.: Modelling of concurrent development of the products, processes and manufacturing systems in product lifecycle context. New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems,. Wiedeń : SCIYO, 2010.
7. Duda J., Stadnicki A.: Modelowanie rozwoju wyrobów. Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie. [aut. książki] Knosala Ryszard. Zakopane: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2011, s.272-283.
8. Duda, J., & Pobożniak, J. (2010). New Word Situation: New Directions in Concurrent Engineering. W J. Pokojski, F. Shuishi, & J. Salwiński, New Word situation: New Direction in Concurrent Engineering (strony 37-44). London: Springer-Verlag.
9. <http://www.bizagi.com>. [data dostępu: 23.02.2011].