

PROJEKTOWANIE PROCESÓW I SYSTEMÓW PRODUKCYJNYCH Z WYKORZYSTANIEM TECHNOLOGII KOMPUTEROWEJ WIRTUALIZACJI

Józef MATUSZEK, Dawid KURCZYK

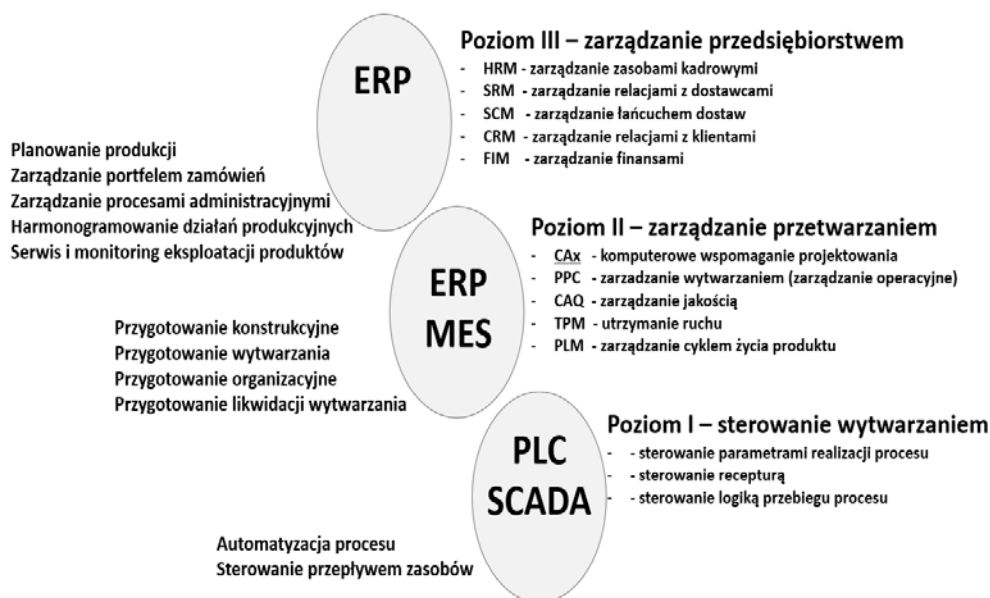
Streszczenie: W artykule przedstawiono współczesne podejście do projektowania procesów produkcyjnych wyrobów. Wyjaśniono pojęcie cyfrowej fabryki. Scharakteryzowano oprogramowanie komputerowe wspomagające wirtualizację procesów i systemów produkcyjnych. Określono tok postępowania w procesach kształtowania produkcji na etapie projektowania i realizacji procesów produkcji. Podano przykłady skanowania, modelowania i animacji projektowanych procesów.

Słowa kluczowe: projektowanie procesów wytwarzania, skanowania, wirtualizacja systemów produkcyjnych

1. Wprowadzenie

Systemy informatyczne znalazły szersze praktyczne zastosowanie w praktyce produkcyjnej w latach 70-tych XX wieku. Ówczesne komputery charakteryzowały się dużymi rozmiarami, wysokimi kosztami zakupu i eksploatacji. Niewielka moc obliczeniowa pozwalała skupić się jedynie na analizie sytuacji w wybranych obszarach przedsiębiorstwa. Początkowo informatyzowano system księgowania, przetwarzania zamówień. Wraz ze wzrostem mocy obliczeniowej komputerów i rozwojem aplikacji komputerowych, systemy informatyczne ewoluowały i rozrastały się obejmując swym działaniem coraz to więcej obszarów przedsiębiorstwa. W latach 80-tych XX w. cechą użytkowanych systemów była realizacja zadań w określonych komórkach organizacyjnych, bez możliwości przepływu informacji między nimi. Odpowiedzią na taki stan rzeczy były narodziny w późniejszych latach koncepcji zintegrowanych systemów wytwarzania CIM (z j. ang. Computer Integrated Manufacturing), która miała zapewniać przepływ informacji pomiędzy modułami systemu w czasie rzeczywistym. Początkowo koncepcja ta napotykała kilka barier jak: brak standaryzacji, integracji danych w centralnej bazie danych, ograniczenia natury technologicznej. Wspomniane bariery udało się wyeliminować wraz z rozwojem technologii informacyjnych i nastaniem ery globalizacji produkcji, z rozproszonym umiejscowieniem procesów wytwarzania [11]. Współczesne uwarunkowania produkcji, konkurencja na rynku, skrócony czas życia produktu, nacisk na jakość, skrócenie cyklu produkcyjnego, obniżenie kosztów, zwiększenie zróżnicowania asortymentu, spowodowały dalszy rozwój systemów umożliwiając przedsiębiorstwom uzyskanie elastyczności i zdolności szybkiej adaptacji do dynamicznie zmieniających się potrzeb rynku – rys.1. Jednym z kierunków takiego rozwoju jest zastosowanie oprogramowania do wirtualizacji przebiegu produkcji na etapie projektowania, co skutkuje szybszą adaptacją do zmieniającego się otoczenia i drastycznym skróceniem czasu i kosztów wdrożenia nowego produktu od momentu rozpoczęcia fazy koncepcji do zakończenia fazy wprowadzenia produktu na rynek [12]. Na rynku wychodząc

naprzeciw tym tendencjom pojawiły się nowej klasy systemy jakimi są oprogramowania „cyfrowej fabryki” –rys. 2. [3, 16]



Rys.1. Stosowane w współczesnych przedsiębiorstwach oprogramowania na różnych poziomach wspomaganie przebiegiem realizacji produkcji (opracowanie własne)

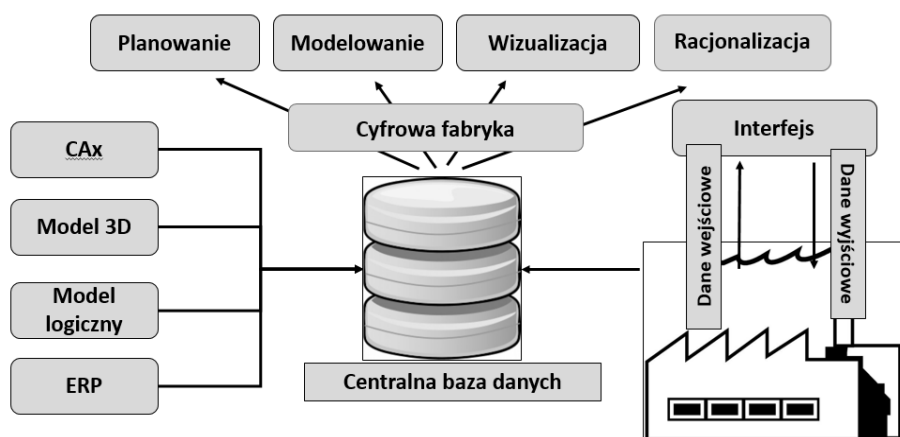


Rys. 2. Obszar zastosowania oprogramowania cyfrowej fabryki (Digital Factory) [16]

Stowarzyszenie Niemieckich Inżynierów (VDI) definiuje pojęcie „cyfrowej fabryki” jako obszerną sieć cyfrowych (komputerowych) modeli, metod i narzędzi (łącznie z symulacją, wizualizacją 3D i wirtualną rzeczywistością), które są zintegrowane i umożliwiają zarządzanie danymi w sposób ciągły. Celem takich działań jest zapewnienie kompleksowego planowania, ciągłej oceny i doskonalenia wszystkich znaczących procesów i zasobów w przedsiębiorstwie łączących się z produktem [7]. Schemat struktury cyfrowej fabryki przedstawiono na rys. 3. Zgromadzone w bazie danych informacje wykorzystuje się do planowania, symulacji oraz wizualizacji systemu produkcyjnego na etapie projektowania.

W zależności od rodzaju i złożoności wyrobów, seryjności wytwarzania, przygotowania organizacyjno-technicznego stosowane są różne metody i techniki przygotowania i wdrażania nowych technologii i produktów do wykonania. W produkcji jednostkowej i małoseryjnej dużą uwagę poświęca się cechom konstrukcyjnym wyrobów gwarantującym uzyskanie na odpowiednim poziomie kosztów i czasu wykonania oczekiwanych efektów użytkowych.

Z punktu widzenia wytwarzania wyrobu zwraca się głównie uwagę na możliwości wykonawcze własne i potencjalnych kooperantów. W produkcji wielkoseryjnej, uruchomienie produkcji nowych produktów ze względu na wielkoseryjność i powiązania kooperacyjne produkcji, projekt produktu i jego planowane efekty wdrożenia winny być zrealizowane z dużym naciskiem na zagadnienia technologiczności konstrukcji, zwłaszcza z punktu widzenia montażu oraz rozwiązania logistyczne przebiegających procesów i zależnych od siebie działań. Projekt procesu produkcji powinien zapewniać minimalizację czasów i kosztów wykonania przy zapewnionych efektach eksploatacyjnych [13]. W obu przypadkach seryjności opracowanie dokumentacji winno się charakteryzować dyscypliną budżetu przewidzianego na realizację projektu, minimalną liczbą błędów, których eliminacja na etapie wytwarzania niesie za sobą ponoszenie znacznych nakładów kosztów i czasów.



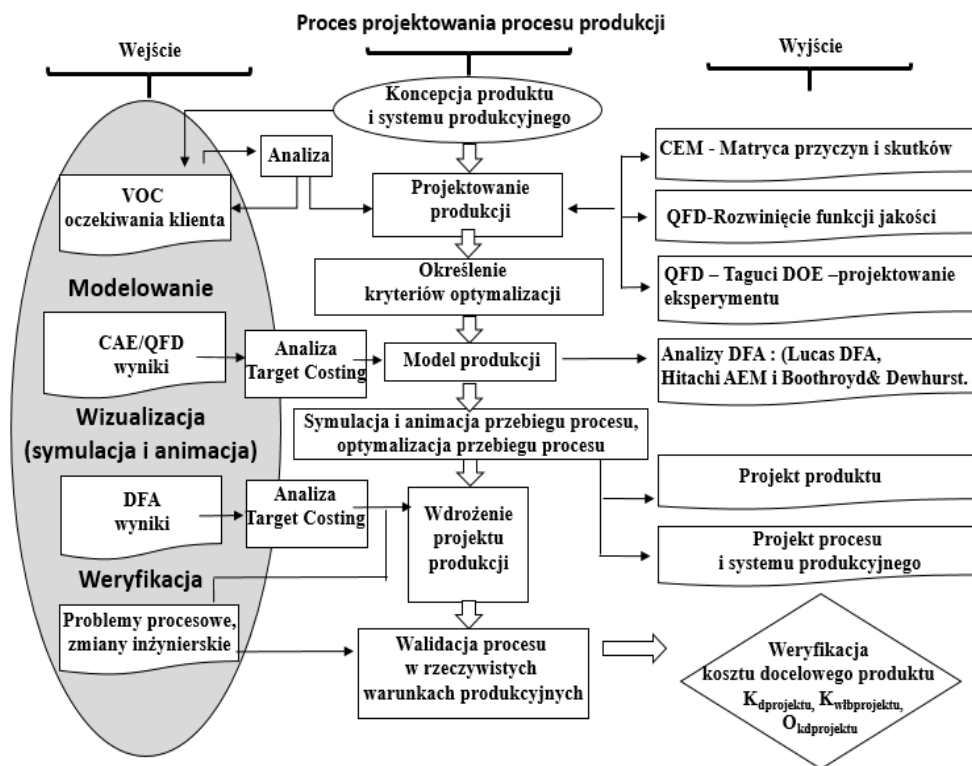
Rys. 3 Struktura cyfrowej fabryki na podstawie [1]

Dzięki takiemu podejściu możliwe jest znalezienie racjonalnego rozwiązania projektu zanim rozpocznie się produkcja w rzeczywistej fabryce. Eliminuje się naprawę ewentualnych błędów na etapie uruchomionej już produkcji w rzeczywistym systemie produkcyjnym [8].

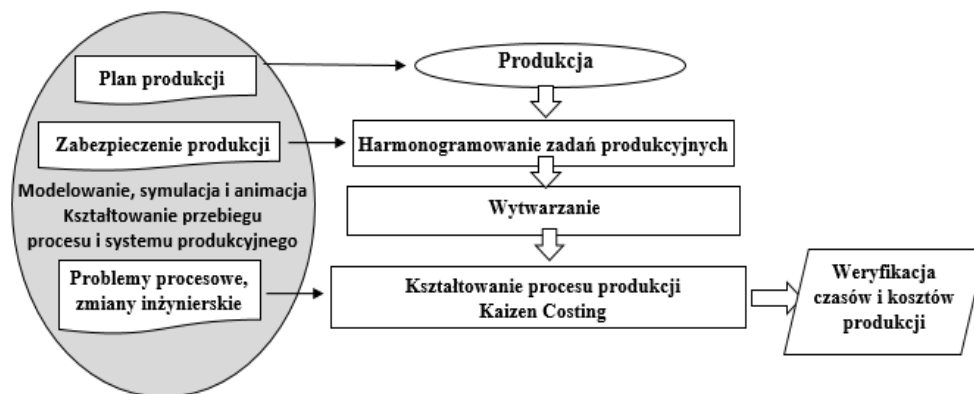
2. Oprogramowanie cyfrowej fabryki

Poszczególne fazy budowy cyfrowej fabryki przedstawiono na rys. 3. Są nimi skanowanie obiektów (hali produkcyjnej, stanowisk pracy, obrabianego przedmiotu), obróbka skanów, opracowanie modelu procesu, przeprowadzanie racjonalizacji przebiegu procesu na drodze wizualizacji (symulacji i animacji) przebiegu procesów. Oprogramowanie wspomagające realizację ww. faz można podzielić wg wykonywanych zakresów prac na poszczególnych etapach projektowania – rys. 3 na trzy rodzaje. Pierwsza grupa to oprogramowanie do obróbki skanów, do pracy z chmurami punktów (Descartes, Microstation). Kolejny rodzaj to oprogramowanie do tworzenia modeli 3D obiektów (AutoCad, Inventor, Solid Edge, Catia). Trzeci rodzaj to oprogramowanie do symulacji i animacji realizowanych procesów (Delmia, Tecnomatix) [15].

Tok postępowania związany z projektowaniem procesu, uwzględniający wymogi z punktu widzenia metod i technik kształtowania procesu przedstawiono na rys. 4. i 5.



Rys. 4. Algorytm projektowania procesu produkcyjnego nowego wyrobu na podstawie [13]



Rys. 5. Algorytm kształtowania procesu produkcyjnego wyrobu na podstawie [13]

W procesie projektowania uwzględniono czynniki związane z celami wynikającymi z [13, 14]:

- oczekiwaniami klienta (metody VOC - j. ang. VOICE OF CUSTOMER),
- procesami projektowania zorientowanego na technologiczność wytwarzania głównie na montowalność (metody DFA j. ang. DESIGN FOR ASSEMBLY),
- kosztów projektowania i realizacji procesu (Target Costing i Kaizen Costing).

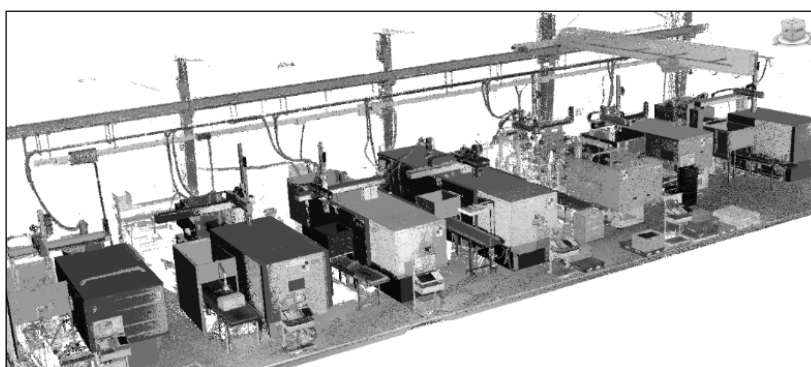
Do oceny wpływu tych oczekiwań stosuje się różne metody i techniki wspomagające projektowanie, najpopularniejsze z nich to: CEM - matryca przyczyn i skutków (Cause and Effect Matrix), QFD - tłumaczone jako rozwinięcie funkcji jakości (Quality Function Deployment). W ramach metod DFA, umożliwiających obiektywną ocenę konstrukcji pod względem np. technologiczności montażu najczęściej są stosowane metody Lucas DFA, Hitachi AEM oraz Boothroyd& Dewhurst) [13].

3. Skanowanie obiektów przemysłowych

Podstawą modelowania procesów jest uprzednie zeskanowanie obiektów mających wpływ na przebieg działań projektowych i wytwarzania. W skanowaniu obiektów największe zastosowanie znalazły skanery laserowe 3D bezstykowe. Otrzymywane wyniki pomiarów zwykle są w postaci chmury punktów (patrz rys. 6) [7, 10]. Chmura punktów to zbiór wokseli czyli punktów rozmieszczonych w przestrzeni trójwymiarowej. Najczęściej punkty te są pokolorowane w odcieniach szarości – rys. 6 lub w kolorach [7].



Rys. 6. Przykład chmury punktów przedstawiającej halę produkcyjną [7]

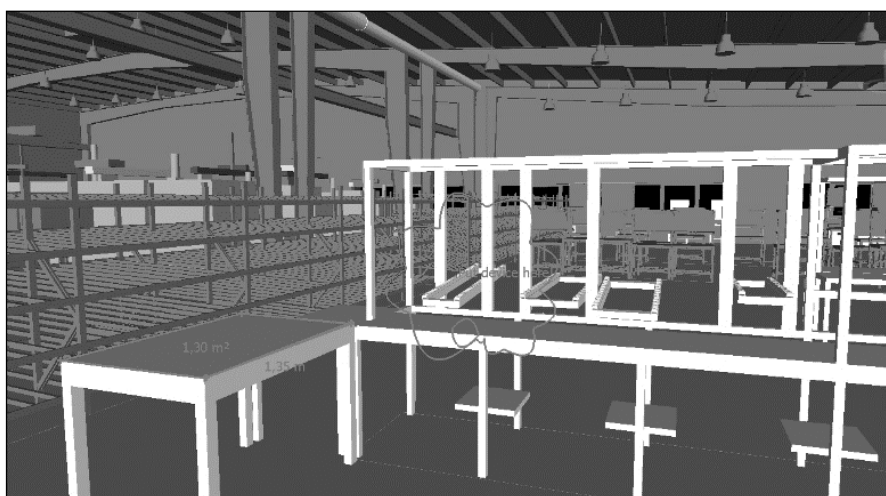


Rys. 7. Wpasowywanie gotowych modeli w chmurę punktów [10]

Chmura punktów podlega obróbce. Tworzenie trójwymiarowego modelu 3D (rys. 7) może zostać zrealizowane w kilku rodzajach programów, stosunkowo najmniej złożone z nich to AutoCad, Inventor, 3ds Max [10].

Dysponując trójwymiarowym modelem przestrzeni roboczej można zaprojektować lub zmodyfikować hale produkcyjne, drogi transportowe, istniejące linie produkcyjne, dokonać oceny projektu przy uwzględnieniu wszystkich ograniczeń i w przypadku zadawalających wyników wdrożyć zmiany [8].

Wizualizacja obiektu przemysłowego umożliwia także odbycie wirtualnego spaceru po hali produkcyjnej np. w celu inspekcji BHP szerokości dróg transportowych – rys. 8 [10].



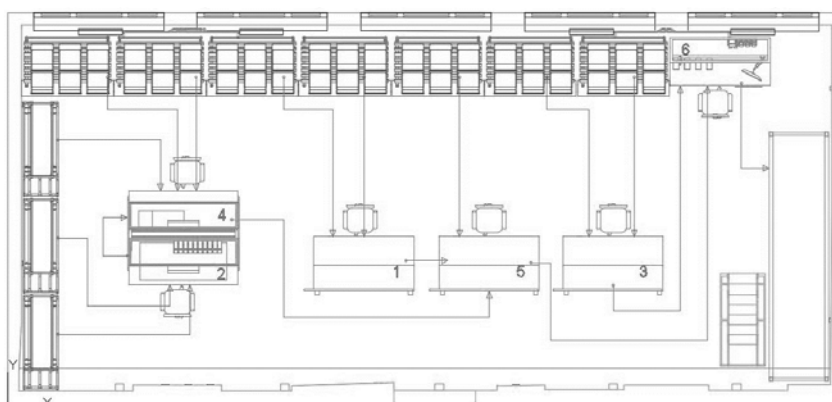
Rys. 8. Wizualizacja obiektu przemysłowego [10]

Model przestrzenny hali produkcyjnej pozwala również na przeprowadzenie harmonogramowania 4D określonego przedsięwzięcia. Tradycyjne harmonogramowanie przeprowadzane skupia się wyłącznie na ograniczeniach czasowych nie analizując ograniczeń przestrzennych [10].

Przestrzenne modele stanowisk pracy i hal przemysłowych pozyskanych w wyniku laserowego skanowania są podstawą symulacji i animacji procesów produkcyjnych w tym logistycznych działań związanych z przemieszczaniem zasobów.

4. Wizualizacja systemu logistycznego przepływów materiałowych

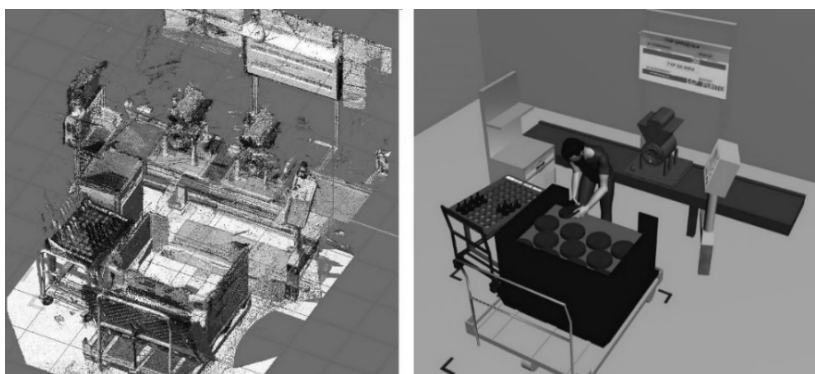
Po zeskanowaniu obiektów – hali, rozmieszczenia stanowisk pracy, można efektywnie projektować drogi wewnętrzne w halach produkcyjnych, miejsca składowania materiałów, półwyrobów, pomocy warsztatowych – rys. 9. Po określeniu czasów realizacji poszczególnych działań produkcyjnych, czasów załadowania, przejazdów i wyładowania materiałów można na drodze animacji przemieszczenia się środków transportu przewidzieć wystąpienia niedociągnięć zaprojektowanych systemów logistycznych w przedsiębiorstwach.



Rys. 9. Komputerowa analiza przepływu materiału
(opracowanie własne)

5. Wizualizacja kształtowania przebiegu pracy na stanowiskach roboczych

Bazując na opracowanym modelu „cyfrowej fabryki” w postaci zamodelowania hali, stanowisk pracy, zdefiniowania operacji wykonywanych w ramach przebiegu pracy, można określić model logiczny realizowanych działań produkcyjnych i przeprowadzić analizy różnych zadanych dla nich przebiegów. W trakcie definiowania środków transportu należy uwzględnić m. in. trasy, prędkość ruchu, koszt eksploatacji a także czasy wykonywania zadań roboczych na stanowiskach pracy, załadunku i rozładunku. W taki sposób można określić racjonalne rozmieszczenie poszczególnych stanowisk, racjonalny przebieg procesu [9, 15].



Rys. 10. Przykład modelu stanowiska wykonany na potrzeby analizy ergonomicznej [15]

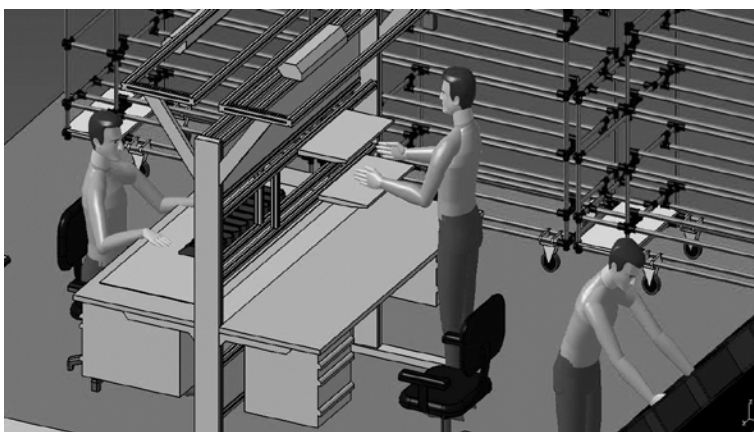
Kolejnym ważnym aspektem w projektowaniu i kształtowaniu systemów produkcyjnych jest ergonomia pracy. Rosnące wymagania dotyczące wydajności pracy, monotonność wykonywanych robót mają wpływ na coraz większą liczbę schorzeń pracowników. Typowymi problemami stojącymi do rozwiązania są: reorganizacja pracy na stanowisku w taki sposób by pracownik wykonywał swoje czynności w złotej strefie, odpowiednie składowanie obok stanowiska przedmiotów pracy, rozmieszczenie pomocy warsztatowych. W trakcie analiz animowanych czynności można rozważać różne warianty rozwiązań przebiegu procesu. Oprogramowanie np. CATIA umożliwia analizować uciążliwość pracy w takich aspektach jak:

kąt zgięcia w pasie, kąt obrotu w pasie, wysokość ramienia roboczego, kąt zgięcia i wyprostowania kolan, kąt obrotu nadgarstka, podnoszenie części i materiałów, zakres roboczy, chodzenie, przenoszenie. Przykład analizy ergonomicznej i kształtowania stanowiska montażu silnika spalinowego przedstawiono na rys. 10 [15]. Analiza wskazała na znaczne obciążenie mięśni nadgarstka pracownika, wykazała potrzebę zastosowania na stanowisku i wprowadzenie innego sposobu rozmieszczenia na stanowisku przedmiotów pracy.

Innym przykładem kształtowania systemu i przebiegu procesu jest wizualizacja pracy na stanowiskach roboczych przedstawionych na rys. 11 i 12.



Rys. 11. Przykład wizualizacji pracy na przykładowych stanowiskach pracy (opracowanie własne)

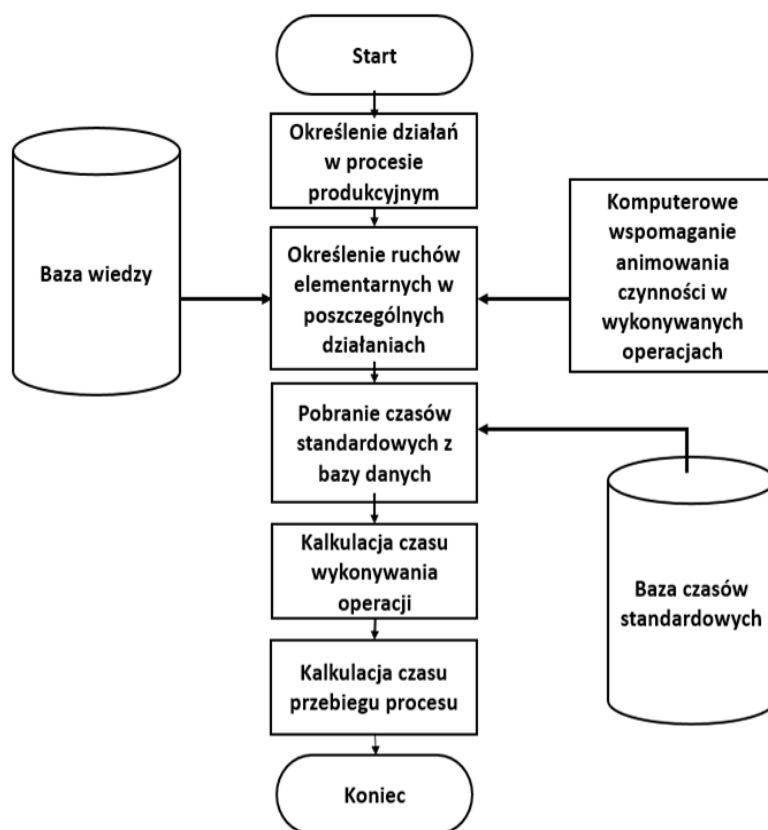


Rys. 12. Przykład wizualizacji pracy w przykładowym gnieździe produkcyjnym (opracowanie własne)

Tak opracowany model logiczny procesu produkcyjnego można powiązać z modelem trójwymiarowym hali produkcyjnej oraz modelami stanowisk powstałymi z wykorzystaniem techniki skanowania trójwymiarowego.

6. Wizualizacja dla potrzeb szacowania czasu pracy

Tradycyjne podejście do szacowania czasu pracy opiera się na danych pozyskanych z pomiarów czasu rzeczywistego lub uzyskanego na podstawie normatywów. Opierając się na założeniu, że każdą ludzką pracę, zarówno ręczną jak i maszynową można rozłożyć na powtarzające się ruchy elementarne, można założyć, że postępowanie odwrotne pozwoli na podstawie ruchów elementarnych z góry określić ruchy konieczne do wykonania określonej czynności – rys. 13, a tym samym oszacować czas potrzebny na wykonanie tej czynności. Pobierając z bazy danych informacje o czasie trwania ruchów elementarnych, jest możliwe po ich scaleniu określić czasy poszczególnych działań procesu [2]. Dzięki temu w trakcie szacowania czasów będzie można uwzględnić także szeregową i równoległą pracę stanowisk oraz czasy przygotowawczo-zakończeniowe, a także czasy przebrojeń.



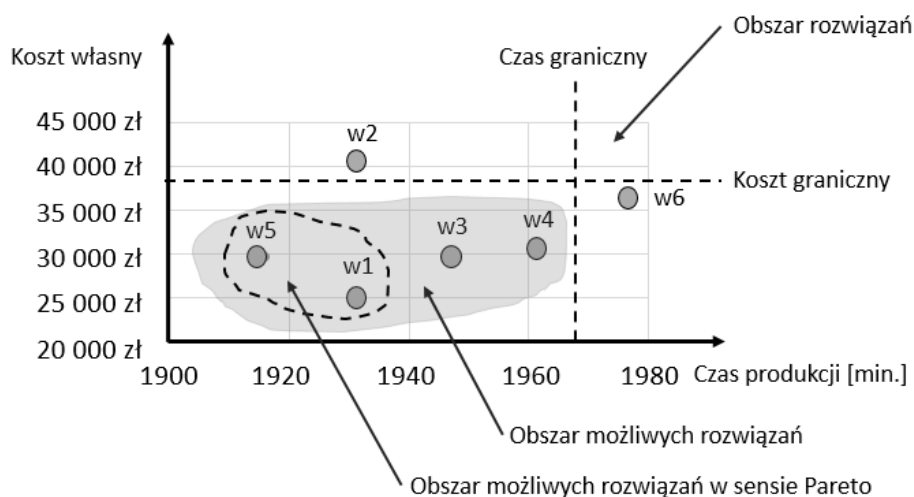
Rys. 13. Automatyczne szacowanie czasu pracy [6]

7. Przykład

Wyniki przeprowadzonej racjonalizacji pracy przykładowego procesu produkcyjnego przedstawiono na rys. 14. Obliczenia optymalizacyjne przeprowadzono z punktu widzenia kryteriów wysokości kosztów własnych i czasów realizacji różnych wariantów procesu. Przeprowadzono symulacje przebiegu procesów dla sześciu wariantów. Poszczególne warianty

różniły się między sobą:

- różnorodnością i usytuowaniem stanowisk pracy względem siebie,
- różnym wyposażeniem stanowisk pracy (różnymi stosowanymi w operacjach procesu pomocami warsztatowymi).



Rys. 14. Określenie optymalnych rozwiązań w sensie Pareto przebiegu procesu produkcyjnego z punktu widzenia kryteriów kosztów własnych wytwarzania i czasów realizacji produkcji (wariant W1 i W5) (opracowanie własne)

W wyniku przeprowadzonej optymalizacji w sensie Pareto otrzymano dwa rozwiązania – W1 i W5. W zależności od uwarunkowań produkcyjnych można wyznaczyć rozwiązanie:

- W1 - jeżeli nie jest ograniczeniem czas wykonania procesu, a chcemy zrealizować proces przy minimalnych kosztach,
- W5 - jeżeli zależy nam na jak najszybszym wykonaniu procesu, a koszt wariantu jest mniejszy od narzuconego ograniczenia kosztowego.

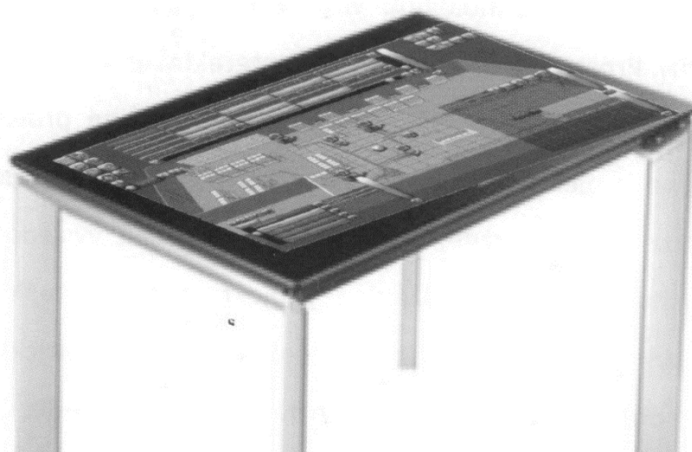
Powyższe dwa rozwiązania są niezdominowane przez pozostałe, każde z nich jest przynajmniej z punktu widzenia jednego kryterium korzystniejsze w stosunku do pozostałych.

8. Podsumowanie

Postęp technologiczny i dynamiczny rozwój systemów informatycznych pozwala na stosowanie coraz to bardziej złożonych, a tym samym bardziej dokładnych sposobów projektowania procesów i systemów produkcyjnych. Coraz większa liczba realizowanych przedsięwzięć inżynierskich wykonywana jest na drodze modelowania 3D i symulacji [4, 5, 7, 8, 11, 12]. Przedstawione w artykule zastosowania technik wirtualizacji opierają się na wykorzystaniu oprogramowania, które coraz częściej nosi nazwę oprogramowania „cyfrowej fabryki” [5]. Opracowanie modeli przebiegu procesu w systemie produkcyjnym jest procesem kosztownym i czasochłonnym, jednak w dalszej perspektywie funkcjonowania przedsiębiorstwa przynosi wymierne korzyści. Ich zastosowanie prowadzi do osiągnięcia niższych kosztów

wdrożenia projektu nowego wyrobu, wyboru racjonalnego z kilku rozważanych rozwiązań, minimalizacji liczby błędów w trakcie realizacji produkcji itd.

Przykładem narzędzia umożliwiającego projektowanie w taki sposób procesów logistycznych w przedsiębiorstwie jest stół Table CEIT [5] – rys.15.



Rys. 15. Komputerowa analiza przepływu materiału na stole Table CEIT [5]

Technika laserowego skanowania 3D jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną, której towarzyszy bardzo duży postęp i szybki rozwój urządzeń skanujących. Skanery 3D znajdują zastosowanie w wielu branżach np. inżynierii przemysłowej, inżynierii lądowej, medycynie, branży rozrywkowej czy kryminalistyce. Należy się spodziewać, że dalszy rozwój skanerów 3D i oprogramowania przyczyni się do znacznego obniżenia kosztów zastosowania techniki laserowego skanowania 3D, co doprowadzi do dalszego rozwoju w projektowaniu i zarządzaniu procesami produkcyjnymi, poszerzy się zakres ich zastosowania np. w inżynierii odwrotnej [5].

Literatura

1. Bracht U., Masurat T., „The Digital Factory between vision and reality,” *Computers in Industry*, pp. 325-333, 2005.
2. Duda J., „Computer Aided Work Time Standardization in Integrated Development of Product, Process and manufacturing System.,” w *New ways in manufacturing technologies 2010*, Presov, 2010.
3. Gregor M., Matuszek J.: *Tendencje projektowania systemów produkcyjnych*. *Mechanik* nr 7/2013, s. 231-238, ISSN: 0025-6552.
4. Gregor M., Medvecký Š, Mičieta Br, Matuszek J., Hrčekova A.: *Digitálny podnik*, Slovenske centrum produktivity Univerzita v Žiline, Žilina 2006. ISBN 80-969391-5-7.
5. Gregor M., Medvecký Št., Štefánik A., Furmann R., Mačuš P.: *3D laserové skenovanie veľkých objektov*. CEIT, Žilina 2016. ISBN 978-80-971684-9-0.
6. Jin Y., Curran R., Butterfield J., Burke R., Welch B., “Automated Assembly Time Analysis Using a Digital Knowledge Based Approach”, 26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences including the 8th AIAA Aviation Technology,

- Integration, and Operations (ATIO) Conference 14 - 19 September 2008, Anchorage, Alaska, USA Paper ICAS 2008-10.3.1 (AIAA 2008-8861).
7. Kurczyk D.: Wykorzystanie techniki laserowego skanowania 3D w różnych branżach przemysłowych, Metody i techniki zarządzania procesami produkcyjnymi. Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2016. ISBN 978-83-65182-36-4, s. 25-36.
 8. Kurczyk D.: Projektowanie systemów produkcyjnych na drodze wizualizacji przebiegu ich pracy", Inżynieria procesów produkcyjnych. Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2013, ISBN 978-83-930399-2-0, s. 99-106.
 9. Kurczyk D.: Wizualizacja systemów produkcyjnych wspomagana pakietem Autodesk Factory Design, Modele inżynierii teleinformatyki: wybrane zastosowania, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2012, ISBN 978-83-7365-298-9, s. 121-126.
 10. Kurczyk D., Szal M.: Wizualizacja obiektu przemysłowego z zastosowaniem skanera laserowego, Innowacyjność akademicka - nowe wyzwania dla nauki i przedsiębiorczości. Wydawnictwo Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej, Bielsko-Biała 2011, ISBN 978-83-62292-50-9, s. 237-246.
 11. Matuszek J.: Inżynieria produkcji. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Filia w Bielsku-Białej. Bielsko-Biała, 2000. ISBN 83-87087-97-1.
 12. Matuszek J., Seneta T.: Algorytmizacja procesu wdrażania nowego produktu w warunkach wielkoseryjnej produkcji. Mechanik nr 7 /2016, s.755-757. ISSN 0025-6552.
 13. Matuszek J., Więcek D.: Współczesne metody i techniki projektowania procesów przygotowania produkcji. Organizacja i zarządzanie: Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej z. 50, 2010, s. 51-59, p-ISSN: 1641-3466.
 14. Matuszek J., Kurczyk D., "Zastosowanie animacji przebiegów procesów produkcyjnych w normowaniu czasów pracy", XVIII międzynarodowa szkoła komputerowego wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji, WAT, Warszawa 2014
 15. Matuszek J., Kurczyk D., „Tendencje rozwoju w projektowaniu i zarządzaniu procesami produkcyjnymi,” w Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji, Opole, 2013.
 16. Kurczyk D., i Zielińska A., „Wybrane narzędzie ergonomiczne w środowisku Delmia,” w Modele inżynierii teleinformatyki: (Wybrane zastosowania), Koszalin, 2011.

Prof. dr hab. inż. Józef MATUSZEK
Mgr inż. Dawid KURCZYK
Katedra Inżynierii Produkcji
Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej
43-309 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2
tel./fax: (0-33) 827 93 49
e-mail: jmatuszek@ath.bielsko.pl,
dkurczyk@ath.bielsko.pl