

dr inż. Janusz Mleczko
Akademia Techniczno-Humanistyczna
w Bielsku-Białej

STEROWANIE BEZODPADOWĄ PRODUKCJĄ WYROBÓW KONFIGUROWALNYCH – STUDIUM PRZYPADKU INTEGRACJI ERP I MES

Zgodnie z wymaganiami współczesnego rynku małe i średnie przedsiębiorstwa muszą oferować szeroką gamę wyrobów dostosowanych do specyficznych i indywidualnych wymagań klienta. Prowadzi to do konieczności jednostkowej produkcji wyrobów konfigurowalnych w bardzo krótkich cyklach wytwarzania. Proponowanym rozwiązaniem jest integracja systemów klasy MES i ERP. Powyższy artykuł przedstawia studium przypadku implementacji zintegrowanego rozwiązania sterowania produkcją bezodpadową rolet zewnętrznych. Obejmuje zagadnienia przygotowania danych dla systemu informatycznego, operacyjne planowanie produkcji, sterowanie bezpośrednie linią produkcyjną oraz nadzorowanie przebiegu procesu produkcyjnego. Przedstawione zagadnienia są rozwiązaniem w prototypowej produkcji w realnym przedsiębiorstwie produkcyjnym średniej wielkości.

CONTROL OF NON-WASTE MANUFACTURING OF CONFIGURABLE PRODUCTS – A CASE STUDY OF MES AND ERP INTEGRATION

According to requirements of the contemporary market the SME's must offer the wide range of products adapted for individual requirements of the customer. This leads to manufacture in very short cycles and to the necessity of the individual production of configurable products. The proposed solution is the integration of MES and ERP systems. This article presents the case study of implementation an integrated solution to non-waste manufacturing of roller shutters. It covers preparation of data for information system, confirming orders in the B2B system, operational planning, direct control and monitoring of manufacturing process. The presented solution is used in the prototype production in the SME.

1. WPROWADZENIE

Od dłuższego czasu firmy działające na współczesnym rynku, aby spełnić wysokie i często zmienne wymagania klienta, zmuszone są do oferowania szerokiej gamy produktów. W wielu przypadkach skróceniu uległy również czasy oczekiwania klienta na wyrób. Klienci stali się bardziej wymagający i chcą zaspokojenia swoich indywidualnych potrzeb. Zamiast produkcji masowej obecnie przedsiębiorstwa zmagają się z masową kastomizacją. Dla wielu przedsiębiorstw oznacza to konieczność jednostkowej produkcji przy zachowaniu spełnienia kryterium kosztowego. Produkcja wyrobów kastomizowanych przy niskich kosztach brzmiąca jak paradoks jest jednocześnie celem dla wielu firm. Dotyczy to szczególnie małych i średnich przedsiębiorstw, będących na tyle mobilnymi organizacjami aby szybko dostosować się do zmiennych warunków otoczenia. Tak więc dostosowanie się okazuje się niezbędne dla zachowania przewagi konkurencyjnej w wielu branżach [16]. Wobec niskich cen wyrobów masowych produkowanych na Dalekim Wschodzie, w warunkach polskich przedsiębiorstw produkcyjnych zwyciężać w walce o wymagającego klienta można tylko

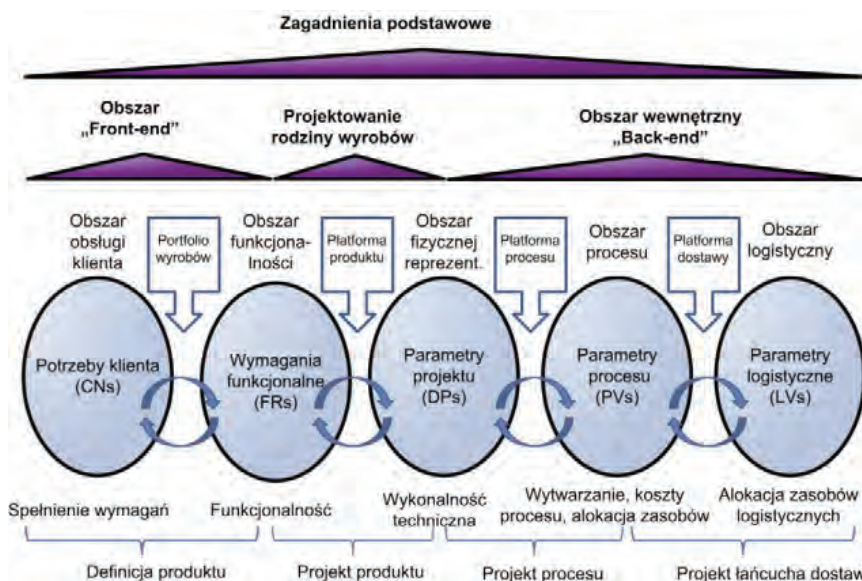
grając krótkim terminem dostawy oraz indywidualizacją oferty. Skrócenie czasu od momentu decyzji klienta do otrzymania wyrobu może dotyczyć wielu aspektów: pozyskania zamówienia, samego procesu wytwarzania jak i dostawy wyrobu do klienta. W poniższym artykule skupiono się na dwu pierwszych zagadnieniach integrując za pomocą systemu informatycznego oba obszary. Pierwszy obszar jest domeną systemów klasy ERP, które ostatnio przeszły metamorfozę do systemów klasy ERP II, umożliwiając implementację procesów B2B. W obszarze wytwarzania systemy ERP rzadko sięgają głęboko, pozostawiając tę domenę dla systemów MES. Powodem jest coraz szersze stosowanie automatyki przemysłowej. W przypadku wyrobów konfigurowalnych głęboka integracja powyższych systemów jest nadal często wyzwaniem a nie powszechną praktyką. Poniżej dokonano analizy przyczyn takiej sytuacji oraz zaproponowano rozwiązanie, wdrożone w praktykę produkcyjną.

2. STOSOWANE ROZWIĄZANIA

Ostatnie badania w zakresie wytwarzania produktów wielowariantowych skupiały się na następujących obszarach: zastosowaniem elastycznych systemów wytwarzania [11], modelowania i definicji struktury wyrobu konfigurowalnego [4, 2], masowej kastomizacji produkcji, zagadnieniami definicji rodzin wyrobów czy też technologii obróbki grupowej (GT). Koncepcja masowej kastomizacji rozumiana jako wytwarzanie wyrobów dostosowanych do potrzeb indywidualnego klienta i adresowana na masowy rynek była szeroko przedstawiana w literaturze naukowej [3, 10]. Ryzyko związane z zagrożeniem zbyt kosztownej realizacji celu „masowej kastomizacji” podano w [5]. Wprowadzenie strategii masowej kastomizacji bez odpowiedniej klasy oprogramowania jest praktycznie niemożliwe. Ponieważ w dużej mierze problem powyższy dotyczy małych i średnich przedsiębiorstw szczególnie istotne jest zastosowanie odpowiednio prostych i tanich rozwiązań. Zastosowanie do tego celu aplikacji klasy ERP jest w dużej mierze niewystarczające. Dotyczy to zarówno sfery kosztowej, jak i konieczności dostosowania aplikacji klasy ERP do wymagań zarządzania rodzinami produktów. Aplikacje do wydajnego zarządzania wytwarzaniem wyrobów konfigurowalnych są w MŚP raczej znane tylko w teorii niż stosowane w praktyce [15]. Wymogiem, ale jednocześnie wyzwaniem ostatnich lat, jest prowadzenie biznesu za pomocą narzędzi internetowych, realizowanych np. klasycznym układzie B2B [9, 14]. W [7] podano zasadnicze obszary zagadnień związanych z projektowaniem i realizacją masowej kastomizacji w oparciu o rodziny wyrobów. Podstawowe zagadnienia obejmują obszary (rys. 1.): „front-end” użytkownika końcowego, projektowania rodziny wyrobów oraz „back-end”, obejmujący zadania realizowane wewnątrz przedsiębiorstwa.

Zagadnienia interfejsu użytkownika końcowego skupiają się na efektywnym i elastycznym narzędziu do prezentacji oferowanej gamy produktów (z uwzględnieniem odpowiedniej ilości opcji konfiguracji) oraz możliwości mapowania wymagań na dobór odpowiedniego produktu i jego opcji. Nie mniej ważny jest obszar związany z projektowaniem rodziny produktów, a w szczególności mapowanie funkcjonalności pożądaną przez odbiorcę na postać fizyczną produktu. Ostatnim obszarem jest wytwarzanie rodzin wyrobów, wraz z optymalną alokacją zasobów oraz dystrybucją wyrobu do użytkownika końcowego. W powyższym obszarze zasadniczą rolę pełni optymalny proces wytwarzania dostosowany do warunków produkcji rodzin wyrobów. Dla optymalnego wytwarzania rodzin wyrobów można zastosować odpowiednie metody klasyfikacji i grupowania zadań. Wytwarzanie oparte o klasyfikację, a później technologię obróbki grupowej było już postulowane od początku lat 40-tych XX wieku. Grupowanie części maszyn było przedmiotem wielu publikacji [1, 6, 8, 13].

Zagadnienie polegało na podziale zbioru maszyn na podzbiory i przydzieleniu do podzbiorów określonych operacji procesu wytwarzania celem optymalizacji czasu przebrojeń. W [13] podjęto próbę rozwiązania problemu metodą analizy skupień (*ang. cluster analysis*).



Rys. 1. Podstawowe zagadnienia związane z zarządzaniem rodzinami wyrobów [7]

3. DEFINICJA PROBLEMU

Podstawowym problemem poruszonym w artykule jest zarządzanie operacyjne i sterowanie produkcją realizowane wewnątrz przedsiębiorstwa powiązane z procesem pozyskiwania zamówień z systemu B2B oraz ERP. W tym kontekście przedstawiony jest problem przygotowania danych oraz automatyzacji sterowania wytwarzaniem wyrobów konfigurowalnych. Aby rozwiązać powyższy problem należy znaleźć odpowiedź na następujące pytania:

1. Jakie dane wyrobów konfigurowalnych są konieczne dla procesu zarządzania?
2. Jakie algorytmy są konieczne do automatyzacji procesu generowania dokumentacji produkcyjnej (o ile jest konieczna)?
3. W jaki sposób zarządzać produkcją na wysokowydajnej linii produkcyjnej o dużych czasach przebrojenia?
4. W jaki sposób monitorować zaawansowanie produkcji i udostępniać powyższe dane dla partnerów biznesowych?

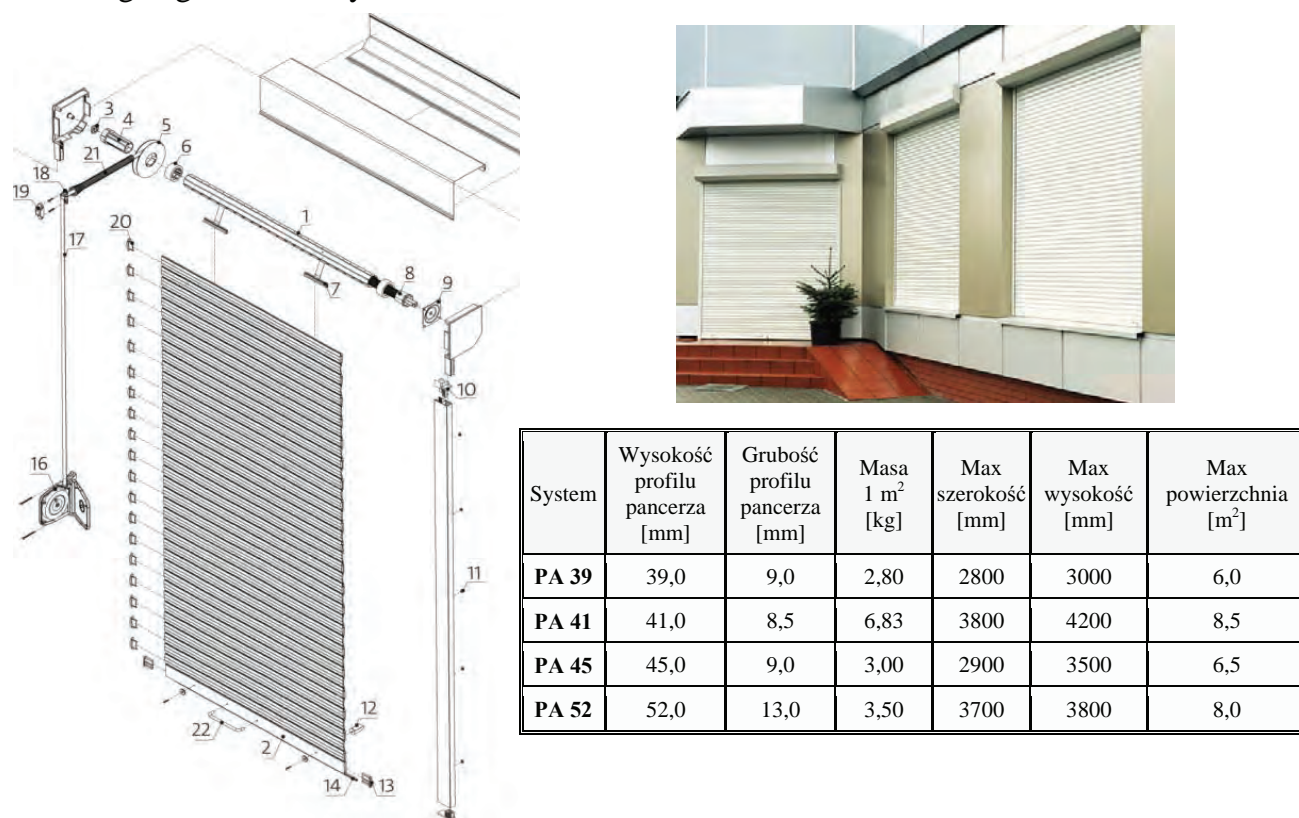
W celu znalezienia odpowiedzi na powyższe pytania zastosowano dynamiczną klasyfikację zadań operacyjnego planu produkcji oraz wykorzystano systemy klasy MES i ERP, integrując odpowiednio powyższe obszary.

4. ROZWIĄZANIE PROBLEMU

Opierając się na rys. 1., rozwiązanie problemu zostanie przedstawione w następującym porządku: generalna koncepcja, modelowanie i tworzenie rodziny produktów, zagadnienia sterowania wytwarzaniem realizowane wewnątrz przedsiębiorstwa. Powyższy artykuł skupia się głównie na ostatnim zagadnieniu. Celem ilustracji zagadnienia podano praktyczny przykład realizacji rozwiązania problemu w praktyce produkcyjnej.

4.1. Przykład produkcji rolet zewnętrznych

Przykład produkcji rolet zewnętrznych zaczerpnięto z praktyki produkcyjnej przedsiębiorstwa średniej wielkości. Powyższa roleta może być wykonana w wielu konfiguracjach. Specyfikację techniczną wyrobu podano na rys. 2. Do najważniejszych cech opcjonalnych należą system pancerza, wymiary: wysokość i szerokość rolety, kolor pancerza, rodzaj napędu i inne wg uzgodnień z użytkownikiem.



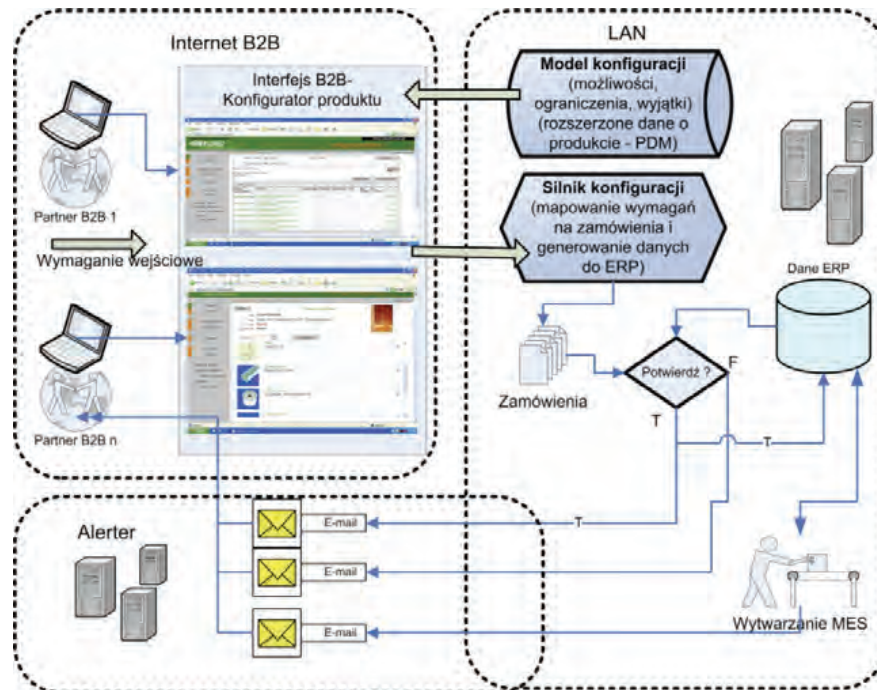
System	Wysokość profilu pancerza [mm]	Grubość profilu pancerza [mm]	Masa 1 m ² [kg]	Max szerokość [mm]	Max wysokość [mm]	Max powierzchnia [m ²]
PA 39	39,0	9,0	2,80	2800	3000	6,0
PA 41	41,0	8,5	6,83	3800	4200	8,5
PA 45	45,0	9,0	3,00	2900	3500	6,5
PA 52	52,0	13,0	3,50	3700	3800	8,0

Rys. 2. Przykład rolety zewnętrznej i jej specyfikacja techniczna [18]

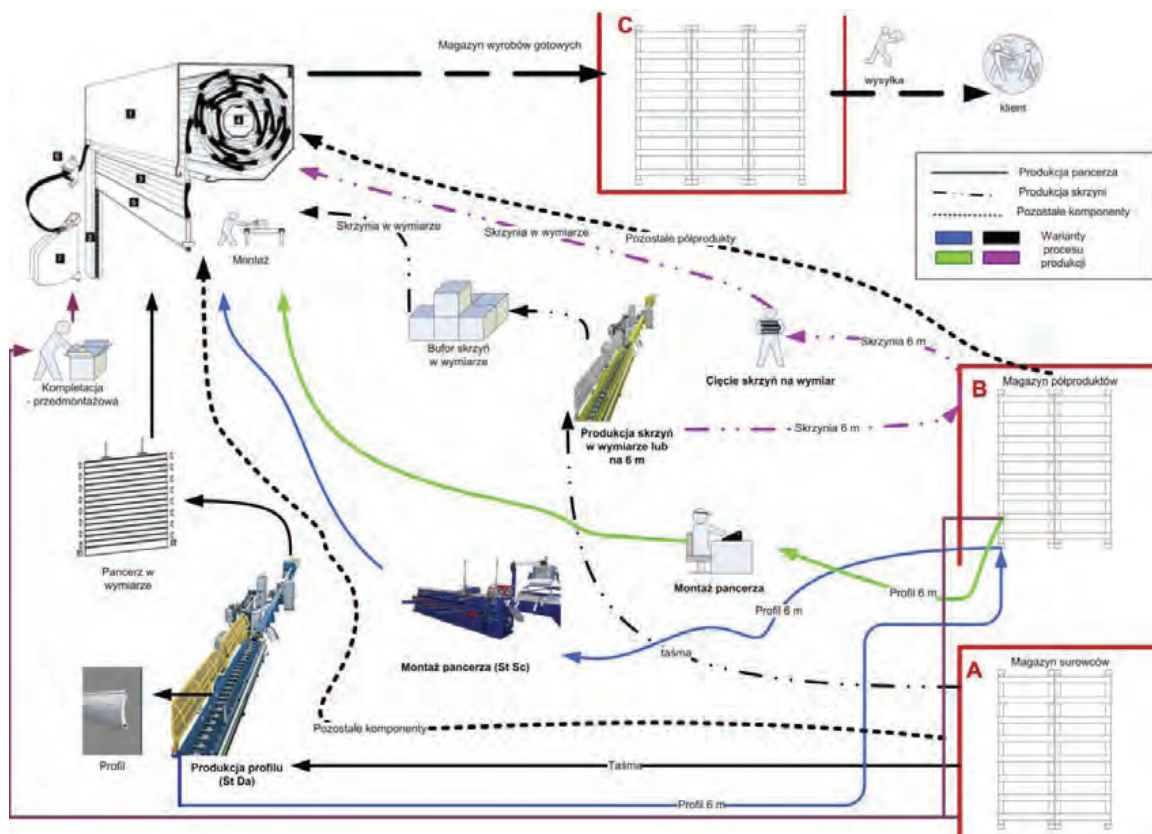
4.2. Generalna koncepcja prezentowanego rozwiązania

Generalna koncepcja zakłada pracę w zintegrowanym środowisku (rys. 3.) systemów informacyjnych. Portal B2B pozwala w oparciu o konfigurator produktu przyjąć kastomizowane zamówienie. Następnie dane w układzie „on line” trafiają do „silnika konfiguracji” (ang. *configurator engine*) dokonującego mapowania wymagań klienta i cech produktu na dane dla systemu ERP. W systemie ERP następuje generowanie struktury i marszruty wyrobu w oparciu o silnik konfiguracji a następnie w oparciu o pozyskane dane oraz ograniczenia systemu wytwarzania następuje potwierdzenie zamówienia. Wyroby są

grupowane wg cech mających zasadniczy wpływ na czas przebrożeń z uwzględnieniem ograniczenia dostępności zasobów. Do grupowania wykorzystywany jest dynamiczny klasyfikator operacyjnego planu produkcji. Proces wykonywany jest wg alternatywnych przebiegów (rys. 4.).



Rys. 3. Generalna koncepcja prezentowanego rozwiązania



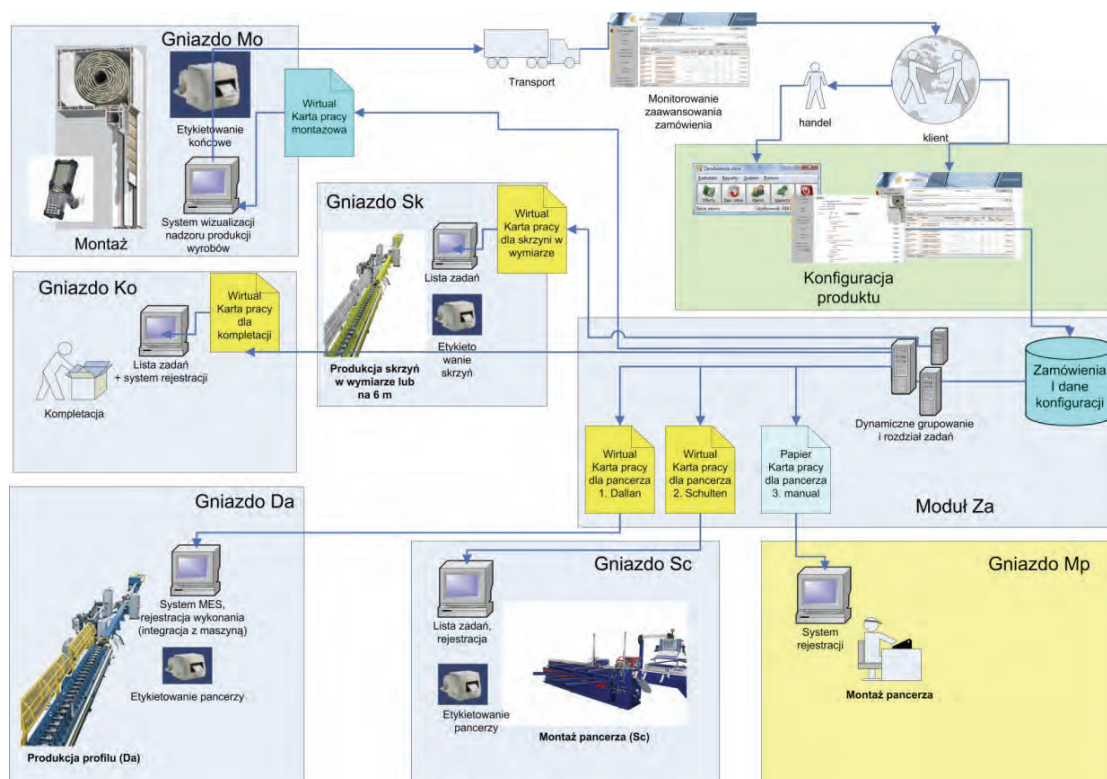
Rys. 4. Alternatywne przebiegi procesu produkcyjnego

Powyższy model został poszerzony o elementy typu „fantom” stanowiące obraz cech abstrakcyjnych (np. kolor). Celem skrócenia pracochłonności przy budowie modelu wprowadzono dodatkowo „wyjątki konfiguracji”, stanowiące wykluczenia konfiguracji wybiegające poza zwykłe zależności hierarchiczne. Przestrzeń konfiguracji (rys. 5) reprezentowana jest przez graf AND/OR z „pniem” (ang. *root*) (PF na rys. 5) rozpoczynającym definicję rodziny produktów (ang. *product family*). Rodzina produktów jest zbudowana ze zbioru możliwych rozwiązań konfiguracji $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ połączonych relacją AND. Każde rozwiązanie $P_i | \forall i \in [1, N]$ może pochodzić z modułów konfiguracji $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$. Każdy moduł konfiguracji $M_i | \forall i \in [1, K]$ może posiadać kilka lub kilkanaście instancji $M_k^* = \{CA_{k1}, CA_{k2}, \dots, CA_{kL_k}\}$ połączonych relacją OR. Jedna i tylko jedna instancja może być wybrana ze zbioru zdefiniowanych rozwiązań. W niektórych przypadkach, np. wymiaru szerokości rolety, wartość wyboru M_k^* może być dokonana z przedziału $M_k^* \in \langle CA_{min}; CA_{max} \rangle$. Każda instancja modułu może być określona przez odpowiadający jej atrybut $A = \{a_{kq}\}$ i jej wartość $D = \{d_{kqr}\}$, gdzie d_{kqr} wskazuje na r -tą wartość q -tego atrybutu związanego z k -tym modulem. W przestrzeni konfiguracji wprowadzono również relację zawierania (ang. *inclusive relation*) budującą zależności hierarchiczne “if-then”. If $C_i = p_{i1}$ then $C_j = p_{j1}$ gdzie C_i, C_j wskazują na moduły (lub atrybuty, fantomy) a p_{i1}, p_{j1} instancje modułów (lub wartości atrybutów) związanych z C_i i C_j . Analogicznie, relacja wykluczenia (ang. *exclusive relation*) tworzy wyjątki w konfiguracji if $C_i = p_{i1}$ then $C_j \neq p_{j1}$. Powyższe wyjątki mogą być również pomiędzy więcej niż dwoma rozwiązaniami w konfiguracji.

4.4. Sterowanie wytwarzaniem rolet zewnętrznych

Sterowanie wytwarzaniem oparte jest o dedykowane rozwiązanie system klasy MES (rys. 6). System sterowania oparty jest o przekazywane na stanowiska pracy „wirtualne karty pracy” w formie elektronicznej listy zadań. Wirtualne karty pracy są przygotowane przez moduł Za (rys. 6) i oparte jest na dynamicznej klasyfikacji zadań operacyjnego planu produkcji. Na stanowiskach, które nie są wyposażone w obrabiarki CNC, potwierdzanie zadań odbywa się na panelu dotykowym. Na stanowiskach Da oraz Sk (rys. 6), zadania z karty pracy są automatycznie transferowane na strumień danych sterujących obrabiarką. Dane do transferu są przygotowane przez „silnik konfiguracji”, a pozyskane pośrednio z portalu B2B. Przykładowe zadania realizowane w gnieździe Da (rys. 6) podano poniżej.

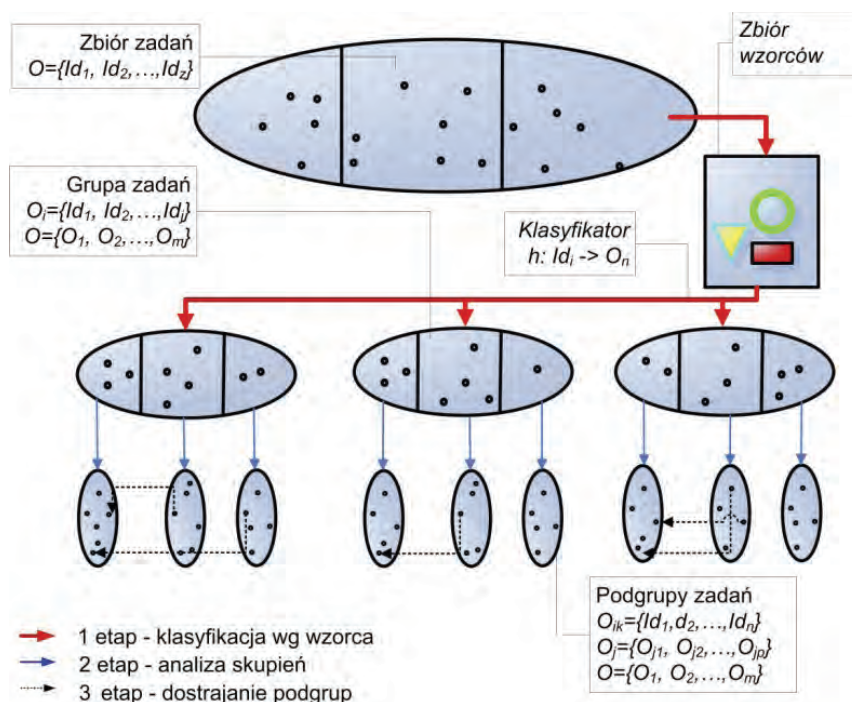
Podstawowym zadaniem gniazda jest przesłanie danych do maszyny i rejestracja wykonania w oparciu o przesłaną na stanowisko listę zadań przygotowaną przez moduł Za. Pracownik po przebrojeniu linii naciska przycisk na ekranie dotykowym i przesyła na maszynę dane (plik lub strumień danych w oparciu o otrzymaną przez producenta specyfikację). Rejestracja wykonania odbywa się, w oparciu o ekran dotykowy, po wykonaniu montażu pancerza. Pracownik po wykonaniu przez maszynę pancerza potwierdza jego wykonanie poprzez przycisk na ekranie dotykowym lub maszyna w komunikacji dwustronnej zwraca informację o wykonaniu, którą potwierdza pracownik (celem kontroli niezgodności w procesie). Po wykonaniu rejestracji wykonania konieczna jest emisja etykiety z numerem pozycji zamówienia dla którego wykonany jest pancerz. Etykieta jest naklejana na pancerz. Po rejestracji odznaczony jest status wykonania na zamówieniu. Alternatywnym rozwiązaniem było dozbrojenie linii w urządzenie znakujące (kod kreskowy nadrukowywany bezpośrednio na pancerzu).



Rys. 6. Sterowanie wytwarzaniem oparte o zintegrowane rozwiązanie B2B, ERP i MES

4.5. Dynamiczna klasyfikacja zadań operacyjnego planu produkcji

Tworzenie dynamicznych grup organizacyjnie podobnych oparte jest o 3-stopniowy algorytm klasyfikacji przedstawiony na rys. 7.



Rys. 7. Trzy stopniowa metoda klasyfikacji grupy organizacyjnie podobne

Zakłada się, że po dynamicznym grupowaniu zadań czas przygotowawczo-zakończeniowy ulega znacznemu zmniejszeniu i wynosi:

$$\mathcal{F}_j = \sum_{k=1}^l \mathcal{F}_{O_k} \cong \sum_{k=1}^l (fsetup_{O_k}(p_1, p_2, \dots, p_t) + \sum_{i=1}^n Fwork_{Id_{i,k}}). \quad (1)$$

gdzie:

\mathcal{F}_j – czas trwania zadań na maszynie j

\mathcal{F}_{O_k} – łączny czas trwania zadań dla grupy O_k , a $O_k: \{Id_i, Id_{i+1}, \dots, Id_n\}$,

$fsetup_{O_k}(p_1, p_2, \dots, p_t)$ – czas przygotowawczo-zakończeniowy dla grupy O_k zależny od parametrów p_1, p_2, \dots, p_t , będących agregatami grupy,

$Fwork_{Id_{i,k}}$ – czas trwania procesu dla zadania Id_i na k – maszynie, i – nr zadania.

Przyjęty algorytm dynamicznej klasyfikacji i grupowania składa się z następujących elementów (trzech kroków) (rys. 7):

1. Klasyfikacja wg wzorca. Formalnie problem może być zapisany następująco: dla danego zbioru zadań $\{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$, tworzony jest klasyfikator $h: X \rightarrow Y$, który przypisuje dla każdego $x \in X$ etykietę klasyfikatora $y \in Y$. Zbiór grup O_1, O_2, \dots, O_m , gdzie $O_i = \{Id_1, Id_2, \dots, Id_z\}$ ma charakter rozłączny i $O_i \subseteq O$, $\cup_i O_i = O$, dla $\forall i, k \in Id$ warunek $O_i \cap O_k = \emptyset$ jest spełniony. Przypisanie elementów zbioru zadań Id_i do zbioru grup O_k jest funkcją zależną od parametrów P : $\{Id_i \in O_k: F(p)\}$. Jako zbiór parametrów klasyfikacji (ang. *set of patterns*) przyjęto: system profilu, kolor profilu.
2. W drugim etapie tworzone są podgrupy. Zasadniczy wpływ na tworzenie podgrup mają parametry organizacyjne: czas dostawy do klienta, priorytet zamówienia, Rozpatrywane są następujące warianty: 1-dniowa agregacja, 2-dniowa agregacja, 3-dniowa agregacja, agregacja do 5 dni). Brane są pod uwagę zadania z tygodniowego okresu czasu.
3. Rozdział zadań na poszczególne alternatywne gniazda wytwarzania polega na analizie zawartości grup (określeniu liczności zadań wraz z analizą wydajnościową), dostrojeniu grupy (np. dodanie zadań na produkcję profilu 6m do wysokości min zapasu na magazynie). Grupy po dostrojeniu są szeregowane wg parametru maksymalne obciążenia i lokowane na poszczególne zasoby. Dzienny plan produkcji jest przesyłany w formie wirtualnej karty pracy na poszczególne stanowiska pracy wyposażone w komputery przemysłowe lub terminale mobilne.

Więcej na temat dynamicznej klasyfikacji zadań podano w [12].

5. PODSUMOWANIE

Wymagania współczesnego klienta, determinują systemy wytwarzania. Strategie małych i średnich przedsiębiorstw coraz częściej skierowane są w kierunku wytwarzania wyrobów kastomizowanych. Obecnie systemy wytwarzania muszą być przygotowane do produkcji rodzin wyrobów w możliwie najkrótszym cyklu produkcji. Zarówno uatrakcyjnieniu oferty handlowej, jak i skróceniu cyklu produkcyjnego służą systemy oparte o model B2B. Jednak przygotowanie danych wyrobów konfigurowalnych, jak i sam proces przyjmowania zamówienia, muszą być wsparte o odpowiednio wydajne modelowanie i informatyczne wspomaganie procesu biznesowego. Połączenie w zintegrowany układ systemów B2B, ERP oraz MES stwarza nową wartość. Dane sterujące mogą być przesłane wprost z systemu planowania, a synchronizacja i monitorowanie zaawansowania realizacji zleceń nadzorowane przez systemy informatyczne. Firma jest w stanie dzięki temu osiągnąć efekt synergii.

Ze względu na przebrojenia nawet wysokowydajnych urządzeń warto pokusić się o optymalizację planów, i to w bardzo trudnym obszarze zarządzania operacyjnego. Jednym z możliwych narzędzi jest dynamiczne grupowanie zadań operacyjnego planu produkcji. Zarówno przeprowadzone badania, jak i praktyka produkcyjna dowiodły użyteczności proponowanych rozwiązań.

BIBLIOGRAFIA

1. Adenso-Diaz B., Lozano S., Eguia I., (2005), *Part-machine grouping using weighted similarity coefficients*. Computers & Industrial Engineering 48 pp. 553–570.
2. Ball A., Ding L., Patel M., (2008), *An approach to accessing product data across system and software revisions*. Advanced Engineering Informatics 22 pp. 222–235
3. Da Silveira G., Borenstein D., Fogliatto F. S., (2001), *Mass customization: Literature review and research directions*. Int. J. Production Economics 72 pp. 1–13.
4. Eynard B., Gallet T., Nowak P., Roucoules L., (2004) , *UML based specifications of PDM product structure and workflow*. Computers in Industry 55 pp. 301–316.
5. Huffman, C., Kahn, B. (1998). *Variety for sale: Mass customization or mass confusion*. Journal of Retailing 74 pp. 491–513
6. Jeon G., Broering M., Leep H.R., Parsaei H.R., Wong J.P., (1998), *Part family formation based on alternative routes during machine failure*. Computers Industry Engineering Vol. 35 pp. 73–76.
7. Jiao J., Simpson T.W, Siddique Z.J., (2007), *Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review*. Intell. Manuf. 18 pp. 5–29.
8. Kulkarni U. R., Kiang Y.M. (1995), *Dynamic grouping of parts in flexible manufacturing systems – A self-organizing neural networks approach*. European Journal of Operational Research 84 pp. 192–212.
9. Luo X., Tu Y., Tang J., Kwong C.K., (2008), *Optimizing customer's selection for configurable product in B2C e-commerce application*. Computers in Industry 59 pp. 767–776.
10. MacCarthy B., Brabazon P.G., Bramham J., (2003), *Fundamental modes of operation for mass customization*. Int. J. Production Economics 85 pp. 289–304.
11. Matta A., Tolio T., Karaesmen F., Dallery Y., (2001), *An integrated approach for the configuration of automated manufacturing systems*. Robotics and Computer Integrated Manufacturing 17 pp. 19–26.
12. Mleczo J. (2010), *Dynamic classification of tasks in condition of unit and small batch production*. Management and Production Engineering Review, Kwartalnik Komitetu Inżynierii Produkcji PAN 2010 Vol.1, No. 3. pp. 41–55.
13. Owsiniński J.W., (2009), *Machine-part grouping and cluster analysis: similarities, distances and grouping criteria*. Bulletin of the Polish Academy of Science, Technical Sciences. Vol. 57, No. 3, pp. 217–228.
14. Slater P.J., (1999), *Pconfig: a Web-based configuration tool for Configure-To-Order products*. Knowledge-Based Systems 12 pp. 223–230.
15. Tralix M.T. , (2001), *From mass production to mass customization*. Journal of Textile and Apparel, Technology and Management Vol.1, Issue 2.
16. Thörn Ch., (2010), *Current state and potential of variability management practices in software-intensive SMEs: Results from a regional industrial survey*. Information and Software Technology 52 pp. 411–421.
17. Zhou Ch., Lin Z., Liu C., *Customer-driven product configuration optimization for assemble-to-order manufacturing enterprises*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2008) 38 pp. 185–194.
18. <http://www.anwis.pl/> (dostęp z 10.11.2010 r.).