

Arkadiusz Gola

Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny,
Instytut Technologicznych Systemów Informatycznych
e-mail: a.gola@pollub.pl

Analiza konfiguracji systemów wytwórczych w aspekcie bilansowania zdolności produkcyjnej

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono analizę konfiguracji systemu produkcyjnego pod kątem stopnia wykorzystania maszyn technologicznych wchodzących w skład systemu. Założono, iż przedmiotem projektowania jest rekonfigurowalny system produkcyjny przeznaczony do produkcji części klasy walek. W ramach zrealizowanych prac, na bazie danych wejściowych, zdefiniowano liczbę niezbędnych maszyn technologicznych (obrabiarek), wyselekcjonowano konfiguracje systemu umożliwiające osiągnięcie wymaganego poziomu produktywności oraz dokonano analizy przebiegu procesu produkcyjnego dla wybranych rozwiązań (konfiguracji), umożliwiających realizację produkcji na zakładanym poziomie. Ocenę przebiegu procesu produkcyjnego przeprowadzono w oparciu o wyniki symulacji zrealizowanych z wykorzystaniem oprogramowania Enterprise Dynamics.

Słowa kluczowe: proces produkcyjny, zdolność produkcyjna, rekonfigurowalny system produkcyjny, konfiguracja systemu wytwórczego.

Wstęp

Współczesny rynek bez wątpienia ulega nieustannym zmianom. Zmiany te są z jednej strony efektem postępującej indywidualizacji potrzeb klientów, z drugiej zaś niespotykanym w ostatnich dekadach postępowaniem technicznym i technologicznym¹. Nie bez znaczenia pozostaje również rosnąca presja konkurencji mająca obecnie charakter globalny². W konsekwencji rodzi to potrzebę nieustannego doskonalenia procesów realizowanych w przedsiębiorstwach produkcyjnych i usługowych³. Dotychczasowe paradygmaty w zakresie wykorzystywanych metod i technik wytwarzania są przelamywane i coraz częściej mówi się,

¹ B. Esmacilian, S. Behdad, B. Wang, *The evolution and future of manufacturing: A review*, "Journal of Manufacturing Systems" 2016, Vol. 39, s. 79–100.

² M. Brzeziński, *Zintegrowane organizacje oparte na wiedzy*, Wyd. Difin, Warszawa 2018, s. 13–14.

³ J. Gawlik, J. Plichta, A. Świć, *Procesy produkcyjne*, PWE, Warszawa 2013, s. 241–244.

iz mamy do czynienia z tzw. czwartą rewolucją przemysłową (określaną w literaturze jako Przemysł 4.0, Industry 4.0 czy też Industrie 4.0), która stawia zupełnie nowe wyzwania w zakresie organizacji produkcji i projektowania systemów produkcyjnych⁴.

Konieczność sprostania współczesnym wymaganiom rynku rodzi potrzebę nieustannych działań określanych jako innowacyjne⁵. Działania te ukierunkowane muszą być zarówno na proces projektowania nowych wyrobów, wychodzących naprzeciw rodzącym się niszom rynkowym, jak również technologii i organizację procesu produkcyjnego, umożliwiające produkcję wyrobów często o bardzo wysokich parametrach konstrukcyjnych, przy jednoczesnym minimalizowaniu kosztów wytwarzania⁶. W konsekwencji powoduje to konieczność poszukiwania nowych form organizacji systemów produkcyjnych, umożliwiających osiągnięcie tych celów⁷. W literaturze przedmiotu co jakiś czas pojawiają się nowe koncepcje systemów produkcyjnych mających stawić czoła pojawiającym się wymaganiom⁸.

Niezależnie od struktury i założeń projektowych współczesny system produkcyjny, musi zapewnić możliwość elastycznej produkcji zróżnicowanego asortymentu wyrobów przy jednoczesnej minimalizacji kosztów wytwarzania⁹. Biorąc pod uwagę fakt, iż wysoki poziom elastyczności wiąże się z wysokimi kosztami produkcji, pojawia się problem znalezienia optymalnego rozwiązania w tym zakresie¹⁰. Zagadnieniem o szczególnym znaczeniu pozostaje kwestia odpowiedniego wykorzystania zdolności produkcyjnej posiadanego systemu produkcyjnego. Zapewnienie możliwie krótkiego cyklu produkcyjnego wyrobu (a tym samym czasu realizacji zlecenia) bardzo często wiąże się z niepełnym lub częściowo irracjonalnym wykorzystaniem posiadanych zdolności produkcyjnych – co w konsekwencji przekłada się na rosnące koszty produkcji¹¹.

Niniejszy artykuł składa się z czterech części. W części pierwszej zilustrowano aktualne wyzwania w zakresie organizacji produkcji i projektowania współczesnych systemów produkcyjnych. W części drugiej przedstawiono problematykę bilansowania zdolności produkcyjnych w kontekście efektywności ekonomicznej realizowanych procesów produkcyjnych. Część trzecia zawiera wyniki analizy procesu produkcyjnego realizowanego w różnych konfiguracjach projektowanego systemu wytwórczego.

⁴ A. Rojko, *Industry 4.0 Concept: Background and Overview*, "International Journal of Interactive Mobile Technologies" 2017, Vol. 11, No. 5, pp. 77–90.

⁵ A. Styś, A. Dejnaka, *Innowacje w biznesie*, Wyd. Difin, Warszawa 2018, s. 6–7.

⁶ M. Relich, P. Pawlewski, *A fuzzy weighted average approach for selecting portfolio of new product development projects*, „Neurocomputing” 2017, Vol. 231, s. 19–27; E. Pająk, *Zarządzanie produkcją, Produkt, technologia, organizacja*, PWN, Warszawa 2006, s. 176; B. Liwowski, R. Kozłowski, *Podstawowe zagadnienia zarządzania produkcją*, Oficyna Wyd. Wolters Kluwer business, Warszawa 2011, s. 77–78.

⁷ D. Plinta, D. Więcek, *Production Systems Design*, Wyd. Naukowe ATH w Bielsku Białej, Bielsko-Biała 2012, s. 8.

⁸ Zob. np.: J. Lewandowski, B. Skołud, D. Plinta, *Organizacja systemów produkcyjnych*, PWE, Warszawa 2014, s. 90–96.

⁹ A. Gola, *Economic Aspects of Manufacturing Systems Design*, "Actual Problems of Economics" 2014, 156 (6), s. 205–212.

¹⁰ I. Lapańska, K. Marek-Kolodziej, P. Wittbrodt, *Elastyczne systemy wytwórcze – rozwój w kierunku cyfrowej produkcji* [w:] Knosala R., *Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji* 2017, Oficyna Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, s. 733.

¹¹ D. Więcek, *Wpływ czynników kosztotwórczych na szacowanie kosztów produkcji elementów maszyn*, „Organizacja i zarządzanie: Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej” 2017, z. 101, s. 533–544.

Współczesne wyzwania organizacji produkcji i systemów produkcyjnych

Wymagania rozwojowe, w obliczu których stoją obecnie przedsiębiorstwa przemysłowe i usługowe, wiążą się z wyzwaniami, jakie pojawiły się we współczesnej gospodarce. Doskonała jakość i niska cena nie są już warunkami uzyskania przewagi konkurencyjnej, lecz podstawą prowadzenia działalności. Klienci oczekują wyrobów innowacyjnych, zróżnicowanych, dostarczanych w mniejszej ilości, a także częstych dostaw i krótkich czasów realizacji zamówień¹². Wyzwania stojące przed współczesnymi przedsiębiorstwami produkcyjnymi można sformułować w postaci następujących pytań¹³:

- Jak sprostać wymaganiom konsumentów, aby produkować wyroby nowoczesne, o wysokich parametrach jakościowych i zdolności do szybkiego dostosowywania się do zmiennych potrzeb klientów?
- Jak zapewnić stałą poprawę produktywności procesów wytwarzania i kanałów dystrybucji?
- Jak doprowadzić do istotnego skrócenia czasu między złożeniem zamówienia a otrzymaniem towaru?

Znalezienie odpowiedzi na powyższe pytania stanowi wyzwanie zarówno dla projektantów systemów wytwórczych, jak również osób odpowiedzialnych za organizację i zarządzanie produkcją w istniejących systemach produkcyjnych.

Systemy produkcyjne będące od kilkadziesiąt lat przedmiotem zainteresowania badaczy organizacji i zarządzania produkcją ulegają pod wpływem nowych metod produkcji etapowym zmianom strukturalnym i funkcjonalnym, związanym również ze skalą wytwarzanej produkcji. Powstało w tym czasie wiele różnorodnych prób klasyfikacji typów produkcji, form organizacji produkcji, rodzajów struktur oraz typologii rodzajów systemów produkcyjnych. Doskonalenie przekształceń technologicznych i metod produkcji przesądziło o nieuniknionym przechodzeniu do coraz nowocześniejszych rozwiązań techniczno-organizacyjnych. Poglębiający się stopień integracji systemów produkcyjnych, elastycznej automatyzacji i komputerowego wspomaganie wszystkich etapów cyklu wytwórczego ukształtował nowe kierunki rozwoju: od konwencjonalnych form organizacyjnych ku nowoczesnym systemom produkcyjnym¹⁴.

Obecnie wydaje się konieczne tworzenie systemów produkcyjnych bazujących na rozwiązaniach technicznych i organizacyjnych, które zapewniają wysoką efektywność funkcjonowania przedsiębiorstwa przy jednoczesnym spełnieniu wszystkich wymogów związanych z oczekiwaniami rynku. W związku z tym organizacja nowoczesnych systemów wytwarzania opiera się na założeniach decentralizacji, automatyzacji i autonomiczności struktur¹⁵. Nowatorską i dynamicznie rozwijającą się koncepcją organizacji systemu produkcyjnego, wpisującą się w założenia czwartej rewolucji przemysłowej,

¹² A. Burduk, *Modelowanie systemów narzędziem oceny stabilności procesów produkcyjnych*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013, s. 21.

¹³ I. Durlik, K. Santarek, *Inżynieria zarządzania III. Naukowe, techniczne i inwestycyjne przygotowanie produkcji wyrobów wysokiej techniki*, Wyd. C. H. Beck, Warszawa 2016, s. 229.

¹⁴ M. Brzeziński, *Organizacja produkcji w przedsiębiorstwie*, Wyd. Difin, Warszawa 2013, s. 86.

¹⁵ M. Dudek, *Szczuple systemy wytwarzania*, Wyd. Difin, Warszawa 2016, s. 77.

pozostaje – powstała w Centrum Badań Inżynierskich w Uniwersytecie Michigan (Stany Zjednoczone) – koncepcja rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych (*Reconfigurable Manufacturing Systems* – RMS).

Istotą rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych jest połączenie zalet konwencjonalnych systemów produkcyjnych z jednoczesnym ukierunkowaniem na¹⁶:

- minimalne skrócenie czasu uruchomienia produkcji nowego wyrobu w systemie,
- minimalizację kosztów związanych z projektowaniem systemu produkcyjnego dostosowanego do produkcji nowego wyrobu,
- eliminowanie kosztów związanych z nadmiernym poziomem elastyczności systemu produkcyjnego.

Do podstawowych cech rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego zalicza się¹⁷:

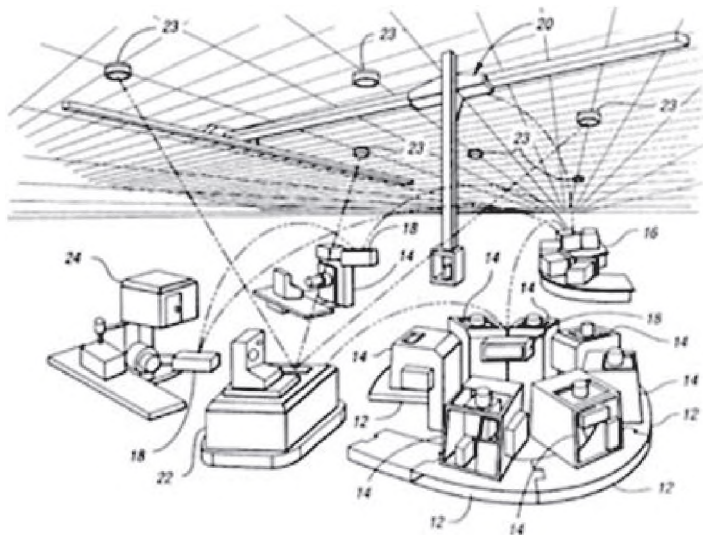
- Modułowość – oznacza, że wszystkie główne składniki systemu (zarówno sprzęt, jak i oprogramowanie) mają budowę modułową. Modułowość umożliwia w przypadku zaistnienia takiej potrzeby łatwą zmianę struktury systemu lub urzędzenia w celu możliwie najlepszego dopasowania do aktualnych potrzeb produkcyjnych.
- Integralność – zdolność do szybkiej i precyzyjnej integracji modułów przez zbiór mechanicznych, informatycznych i kontrolnych połączeń umożliwiających ich integrację i komunikację.
- Racjonalność – rozumiana jako projektowanie systemu ze ścisłym ukierunkowaniem na zapewnienie elastyczności rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego na poziomie ściśle dostosowanym do aktualnych potrzeb produkcyjnych.
- Zmienność – oznacza zdolność do szybkiej zmiany funkcjonalności istniejącego systemu, maszyn i sterowników w celu dostosowania się do nowych zadań produkcyjnych.
- Skalowalność – zdolność do łatwej zmiany poziomu zdolności produkcyjnych RSP przez zmianę struktury rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego lub zmianę zdolności produkcyjnych określonych elementów wchodzących w skład RSP.
- Diagnostyczność – oznaczającą zdolność do automatycznego odczytu aktualnego stanu systemu oraz możliwość wykrywania i diagnozowania przyczyn powstawania braków produkcyjnych oraz natychmiastowego podjęcia działań korygujących.

W skład rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego (rys. 1) wchodzi stanowiska robocze (12) zawierające rekonfigurowalne maszyny obróbkowe (14). System zawiera również w swojej strukturze system sterowania wraz ze stanowiskiem operatora (16) i rekonfigurowalnymi sterownikami (18), które komunikują się ze sobą. Ponadto w strukturze systemu znajduje się system manipulacji, w którego skład wchodzi: robot bramowy (20), wózki bezprzewodowe AGV (22) oraz układ nadajników i odbiorników antenowych (23) komunikujących się z wózkiem AGV. Wózek AGV posiada również łączność z przynajmniej jednym rekonfigurowalnym sterownikiem¹⁸.

¹⁶ Z. Bi, S. Lang, W. Shen, *Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art*, "International Journal of Production Research" 2008, Vol. 46, No. 4, s. 967–992.

¹⁷ M. Mehrabi, G. Ulsoy, Y. Koren, *Reconfigurable manufacturing systems: Key to Future Manufacturing*, "Journal of Intelligent Manufacturing" 2000, Vol. 11, No. 4, pp. 403–419.

¹⁸ Y. Koren, A. Arbor, S. Kota, United States Patent, nr US 6 349 237 z dnia 19 lutego 2002.



Rys. 1. Ogólna struktura rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego

Źródło: Y. Koren, A. Arbor, S. Kota, United States Patent, nr US 6 349 237 z dnia 19 lutego 2002.

Istota i problematyka bilansowania zdolności produkcyjnych

Projektowanie systemów produkcyjnych stanowi jeden z etapów inwestycyjnego przygotowania produkcji, a jego celem jest koncepcyjne i formalne przygotowanie warunków do realizacji zadań produkcyjnych. Wynikiem projektowania jest projekt systemu produkcyjnego, rozumiany jako zestaw dokumentów stanowiących kompletny opis przyszłego systemu produkcyjnego i umożliwiającą jego zbudowanie, uruchomienie (roznuch), a następnie eksploatację. Lista wymagań, jakim powinien odpowiadać projekt systemu produkcyjnego, obejmuje m.in.¹⁹:

- spełnienie wszystkich założeń projektowych, w tym osiągnięcie zakładanej możliwości produkcyjnej, poziomu jakości, wydajności, kosztów jednostkowych produkcji, ekonomicznej efektywności inwestycji;
- odpowiednią elastyczność i możliwość późniejszej rozbudowy i/lub modernizacji systemu;
- łatwość dostępu (powiązanie z zewnętrzną infrastrukturą instalacyjną, transportową i komunikacyjną);
- zapewnienie właściwych warunków pracy i bezpieczeństwa zatrudnionym;
- spełnienie wymagań środowiskowych;
- wysoki poziom innowacyjności wyrobów i procesów.

W procesie projektowania zagadnieniem o kluczowym znaczeniu pozostaje zaplanowanie odpowiedniej zdolności (mocy, możliwości) produkcyjnej systemu, rozumianej jako maksymalna ilość produktu, jaka może zostać wytworzona w określonym czasie²⁰. Planowanie zdolności produkcyjnej ma na celu dopasowanie poziomu mocy produkcyjnej systemu do planowanego zapotrzebowania. Istnienie jej nadmiaru w jakiegokolwiek organizacji oznacza,

¹⁹ Inżynieria produkcji. Kompendium wiedzy, red. R. Knosala, PWE, Warszawa 2017, s. 55–56.

²⁰ D. Waters, Zarządzanie operacyjne. Towary i usługi, PWN, Warszawa 2001, s. 271.

że zbyt dużo zainwestowano w wyposażenie, co jest zarówno nieekonomiczne, jak i drogie. Z drugiej jednak strony niedobory mocy produkcyjnych skutkują niezaspokojeniem pewnej części popytu, co prowadzi do utraty potencjalnej sprzedaży i innych strat.

W ogólnym ujęciu problem planowania zdolności produkcyjnych systemu wytwórczego można sformułować jako poszukiwanie takiego zbioru Z zasobów systemu produkcyjnego, aby²¹:

$$ZP(Z) \geq PZP \text{ przy spełnieniu dodatkowych wymagań i ograniczeń,} \quad (1)$$

gdzie:

$ZP(Z)$ – zdolności produkcyjne projektowanego systemu produkcyjnego, będące funkcją zasobów Z ,

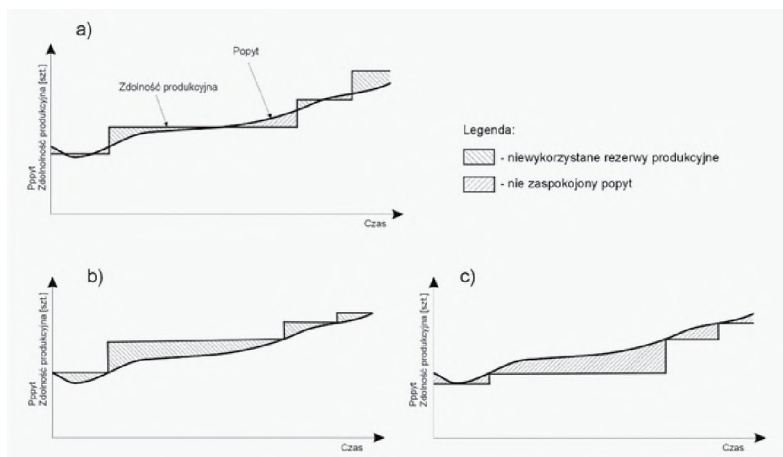
PZP – projektowany (zakładany, prognozowany) program produkcyjny części przewidzianych do produkcji w projektowanym systemie.

W praktyce planowanie zdolności produkcyjnych systemu wytwórczego nie jest zagadnieniem łatwym – polega ono bowiem na możliwie najlepszym jej dopasowaniu do popytu, który w długim okresie często charakteryzuje się mniejszymi lub większymi wahaniami. W konsekwencji możliwe do zastosowania stają się trzy strategie:

Strategia 1: zdolność produkcyjna systemu wytwórczego jest tak planowana, aby w mniejszym lub większym stopniu pokrywać się z zapotrzebowaniem tak, że czasami występuje jej nadmiar, a czasami niedobór – rys. 2a.

Strategia 2: zdolność produkcyjna musi być przynajmniej równa popytowi cały czas, co wymaga większych inwestycji na wyposażenie i daje w rezultacie niższy stopień jej wykorzystania – rys. 2b.

Strategia 3: zdolność produkcyjna jest zwiększana tylko wtedy, gdy dodatkowy sprzęt mógłby być całkowicie wykorzystany, co pociąga za sobą niższe inwestycje i daje wysokie wykorzystanie, ale ogranicza wielkość produkcji – rys. 2c.



Rys. 2. Opcje wzrostu zdolności produkcyjnych: a) zdolność produkcyjna mniej więcej pokrywa popyt; b) zdolność produkcyjna jest zawsze wyższa niż popyt; c) zdolność produkcyjna zawsze pozostaje w tyle za popytem

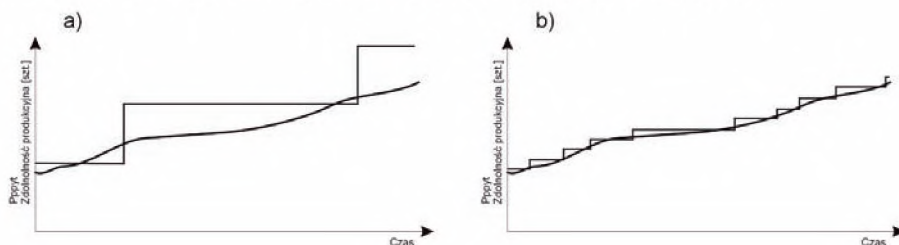
Źródło: opracowanie własne.

²¹ Inżynieria produkcji. Kompendium wiedzy..., s. 48–49.

Każda z tych strategii jest odpowiednia w różnych okolicznościach, ale rzadko można znaleźć takie rozwiązanie, w którym zasoby są wykorzystane w 100%.

Następnym pytaniem w procesie planowania zdolności produkcyjnych jest rozmiar planowanego wzrostu (lub redukcji). Mówiąc o wzroście planowanej zdolności produkcyjnych, można wyróżnić dwa zasadnicze podejścia:

1. Rzadsze, ale większe zmiany zdolności produkcyjnej systemu wytwórczego (rys. 3 a).
2. Częstsze i mniejsze zmiany zdolności produkcyjnej systemu (rys. 3 b).



Rys. 3. Możliwość zwiększania zdolności produkcyjnych: a) w kilku dużych wzrostach; b) w wielu małych krokach

Źródło: opracowanie własne.

Każde z obydwu wyżej wymienionych podejść ma swoje wady i zalety. W przypadku większych, ale rzadszych zmian można wyszczególnić następujące korzyści:

- zdolność produkcyjna systemu może sprostać popytowi w dłuższym okresie,
- istnieje niskie prawdopodobieństwo utraty części sprzedaży,
- mogą się pojawić tzw. korzyści skali,
- można uzyskać przewagę konkurencyjną – m.in. poprzez wykorzystanie posiadanych rezerw sprzedaży w przypadku nieplanowanych wahań popytu,
- rzadsze pojawianie się zakłóceń w procesie produkcji (m.in. w wyniku konieczności reorganizacji struktury systemu produkcyjnego).

Z drugiej strony, wady takiego rozwiązania obejmują:

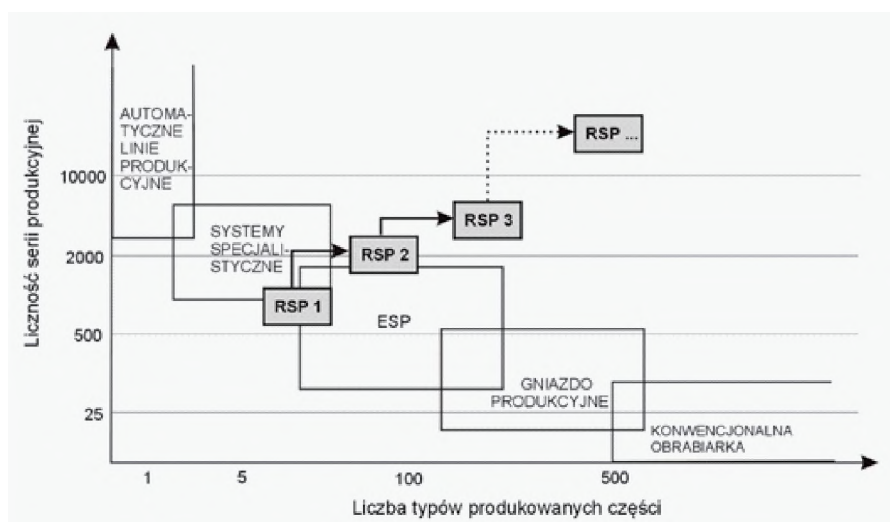
- zdolność produkcyjną uniemożliwiającą produkcję w ilości zaspokajającej istniejący popyt,
- zakłócenia ciągłości procesu produkcyjnego,
- wysokie koszty kapitałowe,
- mały stopień wykorzystania posiadanych zdolności produkcyjnych.
- duże ryzyko w przypadku zmian popytu,
- mało elastyczny sposób postępowania.

Biorąc jednakże pod uwagę aktualne wymagania rynku, przejawiające się m.in. w zmieniających i skracających się seriach produkcyjnych, oraz wysokie koszty będące konsekwencją nadmiernych rezerw produkcyjnych właściwym kierunkiem badań naukowych nad planowaniem i zarządzaniem zdolnością produkcyjną systemów wytwórczych wydaje się prowadzenie prac w kierunku tworzenia systemów produkcyjnych charakteryzujących się zdolnością do szybkiej zmiany konfiguracji sprzętu i oprogramowania w celu uzyskania określonego poziomu funkcjonalności i zdolności produkcyjnych dostosowanych do aktualnych zadań produkcyjnych²².

²² A. Gola, *Strategie planowania zdolności produkcyjnych współczesnych systemów wytwórczych* [w:] *Inżynieria produkcji, zarządzanie procesami produkcyjnymi*, red. J. Matuszek, Wyd. ATH w Bielsku-Białej, Bielsko Biała 2018, s. 9–22.

Problematyka konfiguracji systemów klasy RSP

Zgodnie z definicją rekonfigurowalny system produkcyjny jest projektowany pod kątem możliwości szybkiego dostosowywania funkcjonalności i zdolności produkcyjnych do zadań wynikających ze zmiennego zapotrzebowania rynku przez zmianę struktury systemu zarówno w sferze urządzeń produkcyjnych, jak i oprogramowania²³. Tego typu podejście ma zapewnić możliwość szybkiego przeprojektowywania systemu w celu uzyskania nowego, pożądanego poziomu funkcjonalności i zdolności produkcyjnych dostosowanych do nowych wymagań rynku (rys. 4).



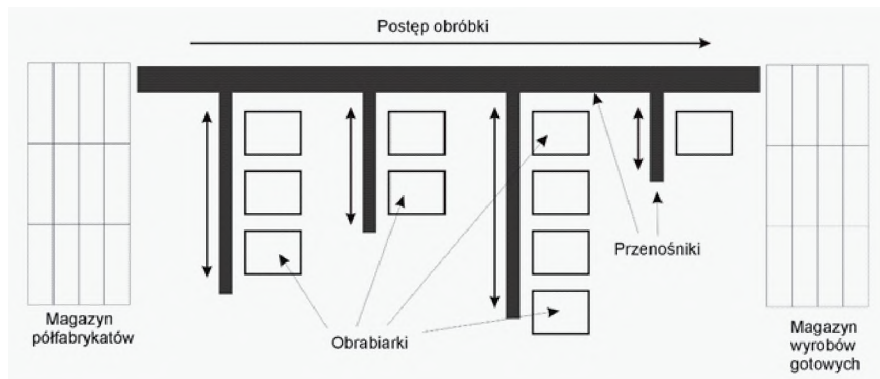
Rys. 4. Funkcjonalność RSP na tle innych systemów produkcyjnych

Źródło: A. Gola, *Procesy produkcji w zautomatyzowanych systemach produkcyjnych (ZSP)* [w:] K. Szatkowski (red.), *Nowoczesne zarządzanie produkcją. Ujęcie procesowe*, PWN, Warszawa 2014, s. 198.

Aby możliwa była dynamiczna zmiana zdolności produkcyjnej, struktura projektowanego systemu musi spełniać warunki możliwości szybkiej zmiany funkcjonalności istniejącego systemu w celu dostosowania się do nowych zadań produkcyjnych. Struktura ta musi więc charakteryzować się modułowością, a tym samym umożliwiać łatwe dodanie lub usunięcie maszyny technologicznej bez konieczności ingerencji w całościową zmianę struktury produkcyjnej i funkcjonowania systemu.

Zgodnie z istotą i założeniami rekonfigurowalnych systemów produkcyjnych struktura RSP jest strukturą umożliwiającą wieloetapową obróbkę części z jednoczesną zamiennością maszyn technologicznych na poszczególnych etapach realizacji procesu produkcyjnego (rys. 5).

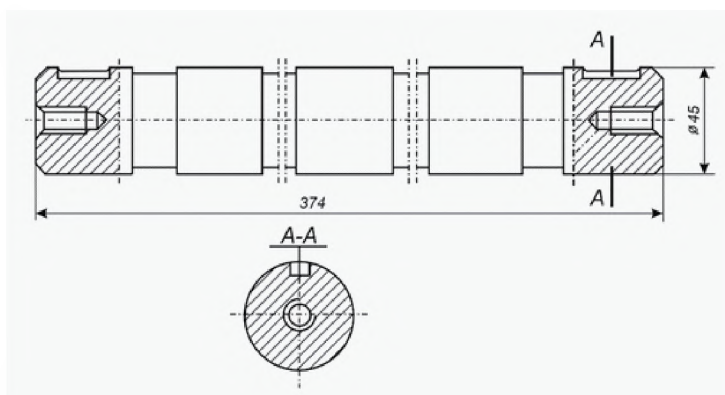
²³ Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, G. Pritschow, G. Ulsoy, H. Van Brussel, *Reconfigurable Manufacturing Systems*, „CIRP Annals” 1999, Vol. 48, Issue 2, s. 527–540.



Rys. 5. Struktura funkcjonalna rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego

Źródło: opracowanie własne.

W celu przedstawienia metodyki wyboru konfiguracji RSP oraz oceny ich wpływu na kształtowanie się wybranych parametrów organizacyjnych projektowanego systemu dla potrzeb analizy przyjęto założenie, iż w systemie produkowane będą części klasy wałek (rys. 6) o procesie technologicznym wyrobu reprezentantem przedstawionym w tabeli. 1.



Rys. 6. Schemat graficzny wyrobu reprezentanta klasy wałek przewidzianego do produkcji w projektowanym systemie wytwórczym

Źródło: opracowanie własne.

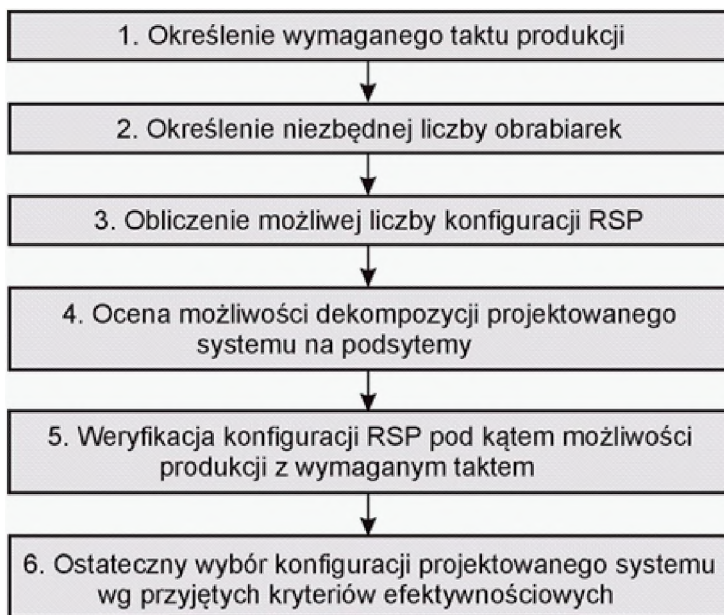
Tabela 1. Proces technologiczny wyrobu reprezentanta

Nr oper.	Opis operacji	t_{pz} [godz.]	t_j [godz.]	t_j [min.]
10	Frezowanie i nakielkowanie	0,4	0,03	1,8
20	Toczenie	0,4	0,06	3,6
30	Gwintowanie	0,45	0,07	4,2
40	Frezowanie	0,25	0,05	3,0
50	Szlifowanie	0,45	0,09	5,4
Razem:			0,3	18

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie przeprowadzonych prognoz założono, iż celem jest zaprojektowanie systemu produkcyjnego klasy RSP umożliwiającego produkcję na poziomie $N_i = 620$ szt./dzień. Projektowany system produkcyjny będzie pracował na trzy zmiany robocze, co oznacza, iż dzienny efektywny fundusz czasu pracy będzie wynosił: $F_j = 1440$ min./dzień (3 zmiany * 8 godz./zmianę * 60 min. godz.). Poziom niezawodności projektowanego systemu produkcyjnego przyjęto na poziomie 95%.

W ogólnym ujęciu metodologia wyboru najlepszej konfiguracji rekonfigurowalnego systemu produkcyjnego obejmuje sześć kroków przedstawionych na rys. 7.



Rys. 7. Etapy wyboru konfiguracji RSP

Źródło: opracowanie własne.

Przy zadanych parametrach organizacyjnych – aby możliwa była produkcja na zakładanym poziomie – takt produkcji projektowanego systemu produkcyjnego powinien wynosić:

$$\tau_i = \frac{F_j}{N_i} = \frac{1440 \text{ min} * 0,95}{620 \text{ szt}} = 2,21 \text{ min/szt.} \quad (2)$$

Niezbędną do realizacji procesu produkcyjnego minimalną liczbę maszyn technologicznych można określić ze wzoru (3).

$$M = \frac{N_i * \sum_{j=1}^n t_{ij}}{F_j * \eta_j} \quad (3)$$

gdzie:

N_i – dzienne zapotrzebowanie na produkowany wyrób (w szt./dzień),

$\sum_{j=1}^n t_{jj}$ – suma czasów jednostkowych realizowanych operacji technologicznych (w min.),

F_j – efektywny fundusz czasu pracy systemu produkcyjnego (w min.),

η_j – poziom niezawodności projektowanego systemu produkcyjnego (w%).

W przypadku systemu będącego przedmiotem projektowania minimalna liczba obrabiarek będzie wynosić zatem dziewięć maszyn:

$$M = \frac{620 * 18,0}{1440 * 0,95} = 8,16 \Rightarrow 9 \text{ obrabiarek} \quad (4)$$

Liczbę możliwych konfiguracji projektowanego systemu produkcyjnego (K) można obliczyć ze wzoru:

$$K = \sum_{m=1}^M \binom{M-1}{m-1} = 2^{M-1} \quad (5)$$

W analizowanym przypadku teoretyczna liczba możliwych konfiguracji będzie zatem wynosić: $K = 256$ ($K = 2^{9-1}$).

Warto jednakże zauważyć, iż biorąc pod uwagę możliwość zastosowania obrabiarek wielozadaniowych, istnieje teoretyczna możliwość podzielenia projektowanego systemu na dwa podsystemy, gdzie w pierwszym z nich będą realizowane operacje frezowania i nakielkowania, toczenia, gwintowania oraz frezowania, a w drugim operacja szlifierska. W związku z powyższym w skład obydwu podsystemów będzie wchodzić następująca liczba obrabiarek:

$$\text{Podsystem 1: } M = \frac{620 * 12,6}{1444 * 0,95} = 5,71 \Rightarrow 6 \text{ obrabiarek}, \quad (6)$$

$$\text{Podsystem 2: } M = \frac{620 * 5,4}{1444 * 0,95} = 2,45 \Rightarrow 3 \text{ obrabiarki} \quad (7)$$

Tym samym teoretyczna liczba konfiguracji dla podsystemu 1 wynosi: $K_1 = 32$ ($K_1 = 2^{6-1}$) a dla podsystemu 2: $K_2 = 4$ ($K_2 = 2^{3-1}$).

Należy jednakże zauważyć, iż w przypadku pierwszego z podsystemów produkcja może być realizowana maksymalnie w czterech etapach, a w przypadku drugiego tylko w jednym – co dalej redukuje liczbę możliwych konfiguracji dla projektowanego RSP (rys. 8).

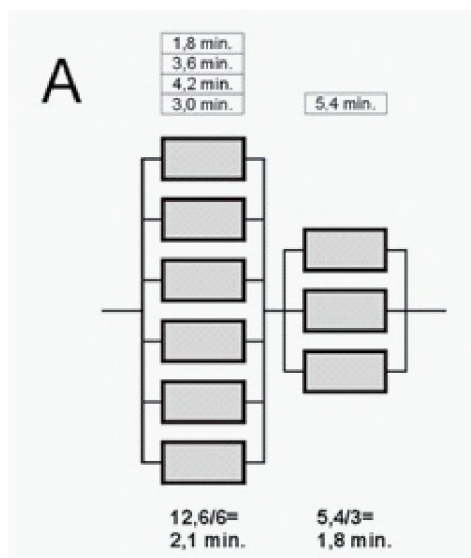
		Liczba etapów (m)							
		1	2	3	4	5	6	7	
Liczba maszyn (N)	1	1							Liczba możliwych konfiguracji dla podsystemu 2
	2	1	1						
	3	1	2	1					
	4	1	3	3	1				Liczba możliwych konfiguracji dla podsystemu 1
	5	1	4	6	4	1			
	6	1	5	10	10	5	1		
	7	1	6	15	20	15	6	1	

Rys. 8. Zastosowanie trójkąta Pascala dla potrzeb określenia liczby konfiguracji projektowanego systemu produkcyjnego

Źródło: opracowanie własne.

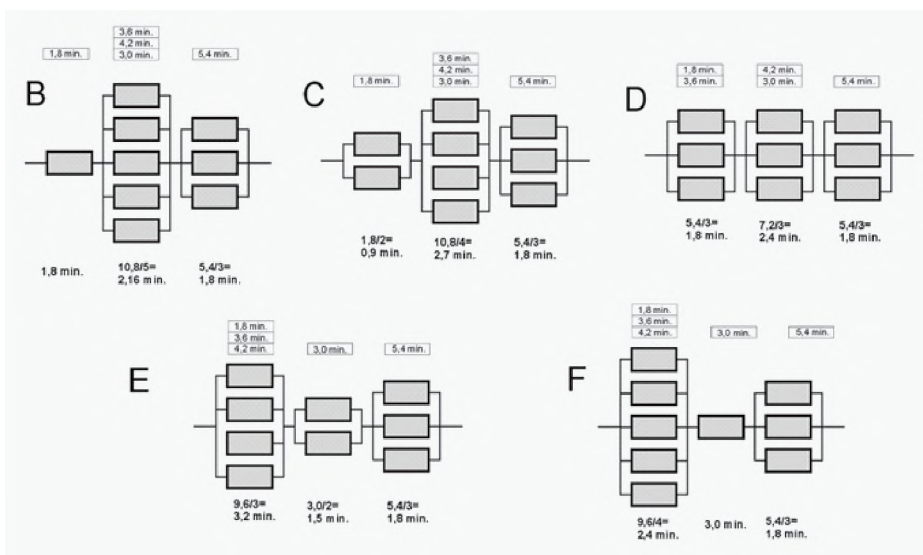
Jak wynika z rysunku 8, dla pierwszego z projektowanych podsystemów liczba możliwych konfiguracji wynosi 26, dla drugiego zaś tylko 1, co w konsekwencji daje możliwość konfiguracji systemu:

- produkcja w dwóch etapach – 1 konfiguracja (rys. 9)
- produkcja w trzech etapach – 5 konfiguracji (rys. 10)
- produkcja w czterech etapach – 10 konfiguracji (rys. 11)
- produkcja w pięciu etapach – 10 konfiguracji (rys. 12).



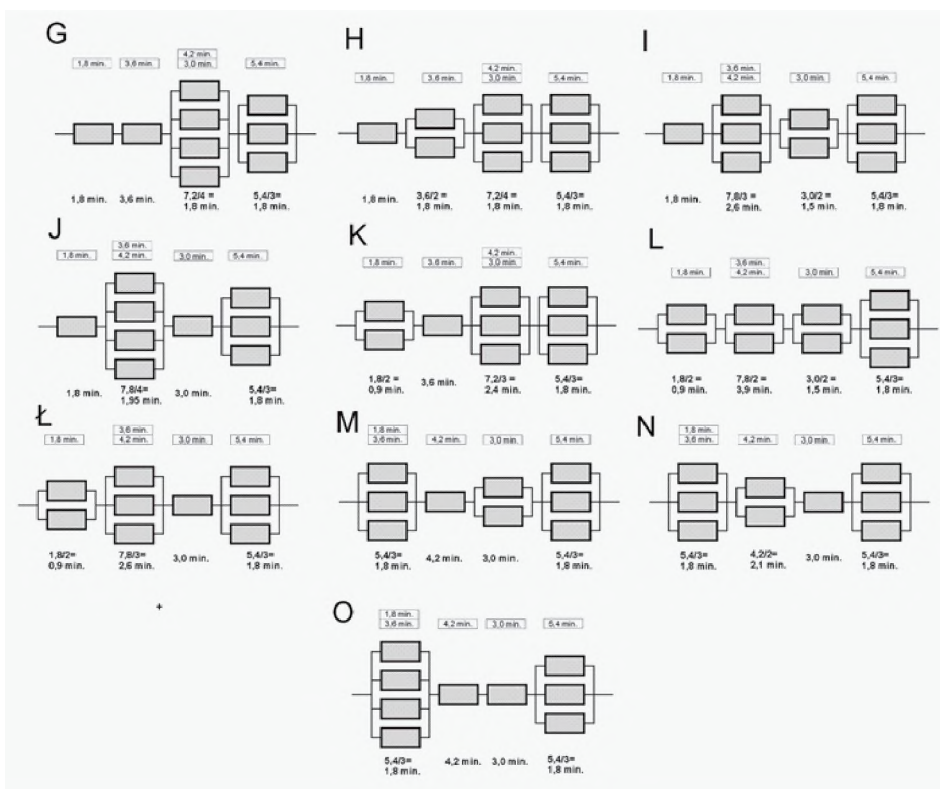
Rys. 9. Konfiguracje RSP dla produkcji realizowanej w dwóch etapach

Źródło: opracowanie własne.



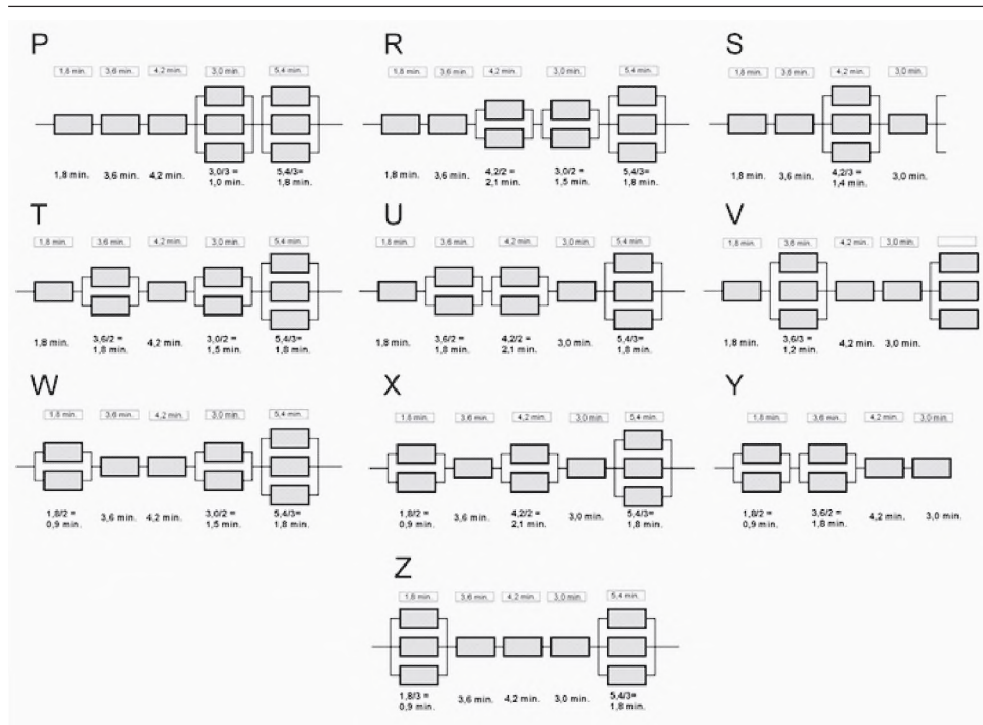
Rys. 10. Konfiguracje RSP dla produkcji realizowanej w trzech etapach

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 11. Konfiguracje RSP dla produkcji realizowanej w czterech etapach

Źródło: opracowanie własne.

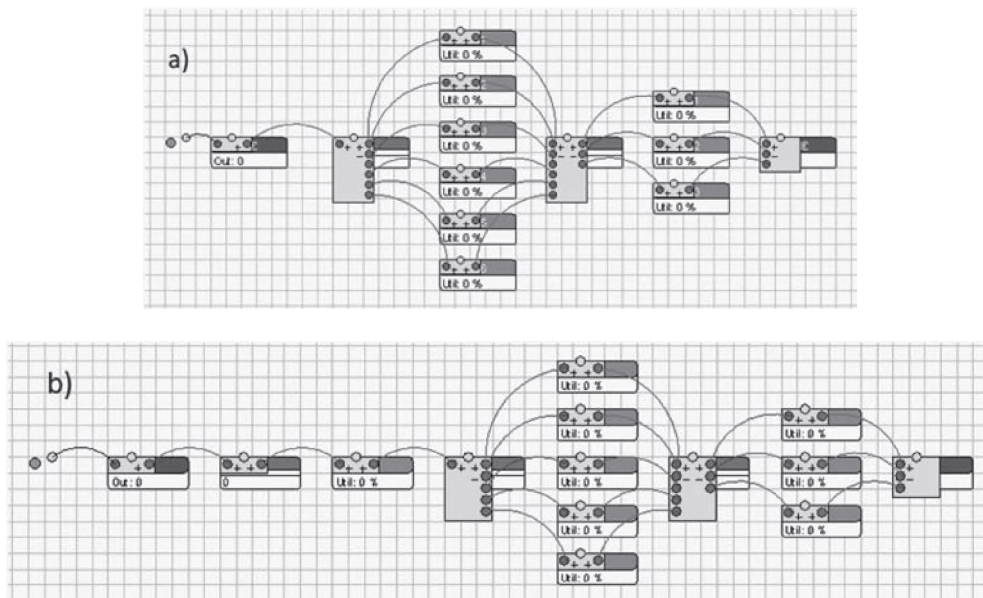


Rys. 12. Konfiguracje RSP dla produkcji realizowanej w pięciu etapach

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z teoretycznej analizy przepływu spośród przedstawionych powyżej 26 konfiguracji systemu, tylko dwie (konfiguracja A i konfiguracja B) dają możliwość produkcji z wymaganym taktom produkcyjnym. W przypadku pozostałych 24 rozwiązań występujące w systemie wąskie gardła uniemożliwiają produkcję z zakładaną wydajnością – a zatem eliminują je z dalszej analizy w zakresie możliwości ich wykorzystania dla potrzeb projektowanego RSP. W związku z powyższym możliwe scenariusze zakładają projekt procesu produkcji w dwóch (dla konfiguracji A) lub trzech (dla konfiguracji B) etapach.

Aby dokonać finalnego wyboru konfiguracji projektowanego systemu, przeprowadzono analizę procesu produkcji z wykorzystaniem metod symulacji komputerowej. Wykorzystując oprogramowanie Enterprise Dynamics, zamodelowano strukturę funkcjonalną RSP, opartą na obydwu konfiguracjach (rys. 13), oraz przeprowadzono symulacje przebiegu procesu produkcyjnego z założeniem parametrów i norm techniczno-organizacyjnych zdefiniowanych na etapie wstępnym zadania projektowego. Na obecnym etapie projektowania pominięto zagadnienia związane z transportem wewnętrznym. Aby w maksymalny sposób odzwierciedlić rzeczywisty przebieg produkcji, założono, iż wyroby do systemu będą wchodzić z częstotliwością mającą charakter losowy, ze średnią wartością oczekiwaną na poziomie 265 sekund (wartość odpowiadająca wymaganemu taktowi produkcyjnemu).



Rys. 13. Modele struktury funkcjonalnej systemu RSP w programie Enterprise Dynamics:
a) dla konfiguracji A, b) dla konfiguracji B

Źródło: opracowanie własne.

W związku z losowym charakterem eksperymentu dla każdej z konfiguracji eksperyment symulacyjny powtórzono 20-krotnie, gromadząc dane dotyczące ilości produktów, które weszły do systemu i wyszły w trakcie trwania symulacji, obciążenia poszczególnych obrabiarek w trakcie całego procesu oraz ilości zapasów produkcji w toku pozostającej w magazynach buforowych w momencie zakończenia procesu symulacji. Otrzymane rezultaty dla obydwu analizowanych rozwiązań zostały przedstawione w tabelach 1–6.

Tabela 1. Wielkość zrealizowanej produkcji w trakcie eksperymentów symulacyjnych – dla konfiguracji A

Lp.	Liczba wyrobów, które weszły do systemu	Produkcja zakończona	Produkcja nie zakończona	Liczba wyrobów w buforach na zakończenie procesu symulacji	
				BUFOR 1	BUFOR 2
1	620	608	12	2	1
2	613	604	9	1	0
3	620	620	0	0	0
4	620	620	0	0	0
5	620	620	0	0	0
6	620	620	0	0	0
7	620	612	8	0	0
8	620	611	9	1	0
9	607	599	8	0	0
10	620	617	3	0	0

11	620	620	0	0	0
12	597	588	9	1	0
13	620	620	0	0	0
14	588	580	8	0	0
15	620	620	0	0	0
16	620	615	5	0	0
17	620	605	15	6	0
18	620	610	10	1	0
19	620	620	0	0	0
20	620	617	3	0	0
Średn.	616,25	611,3	4,95	0,6	0,05

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2. Średnie obciążenie obrabiarek w trakcie procesów symulacyjnych – dla konfiguracji A

Lp.	Średnie obciążenie obrabiarek w trakcie procesu symulacji (w%)								
	OBR. 1.1	OBR. 1.2	OBR. 1.3	OBR. 1.4	OBR. 1.5	OBR. 1.6	OBR. 2.1	OBR. 2.2	OBR. 2.3
1.	94,8	94,6	94,3	94,3	94,2	94,0	80,1	80,5	80,3
2.	93,9	93,8	93,7	93,4	93,2	93,1	79,7	79,7	79,6
3.	95,8	95,8	94,9	94,9	94,9	94,9	81,7	81,7	81,3
4.	95,8	95,8	94,9	94,9	94,9	94,9	81,7	81,3	81,7
5.	95,8	95,8	94,9	94,9	94,9	94,9	81,3	81,7	81,7
6.	95,8	95,8	94,9	94,9	94,9	94,9	81,7	81,7	81,3
7.	95,1	95,1	94,8	94,7	94,5	94,4	80,7	80,5	80,8
8.	95,0	94,8	94,7	94,5	94,3	94,2	80,4	80,7	80,5
9.	93,1	92,9	92,8	92,7	92,6	92,5	78,9	78,9	79,1
10.	95,8	95,8	94,9	94,9	94,9	94,9	81,5	81,3	81,3
11.	95,8	95,8	94,9	94,9	94,9	94,9	81,7	81,3	81,7
12.	91,6	91,4	91,1	91,0	91,9	90,7	77,4	77,8	77,6
13.	95,8	95,8	94,9	94,9	94,9	94,9	81,7	81,7	81,3
14.	90,2	90,0	89,9	89,8	89,5	89,3	76,5	76,3	76,6
15.	95,8	95,8	94,9	94,9	94,9	94,9	81,7	81,3	81,7
16.	95,6	95,5	94,9	94,9	94,9	94,9	81,0	81,2	81,1
17.	94,1	94,0	93,8	93,6	93,5	93,3	79,6	79,9	79,8
18.	95,0	94,8	94,6	94,4	94,3	94,2	80,6	80,5	80,3
19.	95,8	95,8	94,9	94,9	94,9	94,9	81,3	81,7	81,7
20.	95,8	95,7	94,9	94,9	94,9	94,9	81,4	81,3	81,2
Śr.	94,8	94,7	94,2	94,1	94,1	94,0	80,5	80,5	80,5

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3. Obciążenie buforów międzyoperacyjnych w trakcie procesów symulacyjnych – dla konfiguracji A

Lp.	Maksymalny stan bufora		Średni stan w buforze		Średni czas oczekiwania na obróbkę	
	BUF. 1	BUF. 2	BUF. 1	BUF. 2	BUF. 1	BUF. 2
1.	10	1	2,264	0,066	299,199	8,679
2.	11	2	1,440	0,098	193,111	13,316
3.	17	2	5,196	0,198	687,887	26,249
4.	25	1	13,802	0,212	1827,159	28,074
5.	20	2	4,047	0,078	535,727	10,382
6.	15	2	3,532	0,192	467,646	25,407
7.	7	3	1,699	0,139	224,954	18,582
8.	10	2	2,460	0,136	325,470	18,232
9.	8	2	1,266	0,089	171,167	12,117
10.	18	2	4,142	0,069	548,341	9,087
11.	12	2	3,551	0,025	470,166	3,307
12.	6	2	0,756	0,133	104,050	18,536
13.	12	2	3,715	0,052	491,813	6,887
14.	5	2	0,494	0,068	68,966	9,658
15.	7	2	2,046	0,132	270,892	17,422
16.	14	1	3,271	0,090	433,078	11,955
17.	18	2	2,283	0,056	293,923	7,541
18.	11	1	2,073	0,087	273,935	11,692
19.	18	1	5,360	0,034	709,628	4,536
20.	9	2	1,822	0,044	241,210	5,788
Średn.	12,65	1,8	3,26095	0,0999	431,9161	13,37235

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4. Wielkość zrealizowanej produkcji w trakcie eksperymentów symulacyjnych – dla konfiguracji B

Lp.	Liczba wyrobów, które weszły do systemu	Produkcja zakończona	Produkcja nie zakończona	Liczba wyrobów w buforach na zakończenie procesu symulacji		
				BUFOR 1	BUFOR 2	BUFOR 3
1.	620	604	14	2	5	0
2.	616	609	7	0	0	0
3.	612	601	11	0	4	0
4.	620	617	3	0	0	0
5.	617	602	15	0	7	0
6.	620	618	2	0	0	0

7.	620	620	0	0	0	0
8.	611	604	7	0	0	0
9.	620	604	14	1	7	0
10.	620	617	3	0	0	0
11.	611	603	8	0	0	0
12.	616	605	11	0	2	0
13.	619	607	12	0	3	0
14.	620	619	1	0	0	0
15.	620	597	23	0	15	0
16.	620	608	12	0	4	0
17.	620	609	11	0	4	0
18.	620	610	10	0	3	0
19.	620	616	4	0	0	0
20.	617	607	10	0	2	0
Śr.	617,8421	608,85	8,9	0,15	2,8	0

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 5. Średnie obciążenie obrabiarek w trakcie procesów symulacyjnych – dla konfiguracji B

Lp.	Średnie obciążenie obrabiarek w trakcie procesu symulacji [w%]								
	OBR. 1	OBR. 2.1	OBR. 2.2	OBR. 2.3	OBR. 2.4	OBR. 2.5	OBR. 2.1	OBR. 2.2	OBR. 2.3
1.	81,3	95,6	96,4	96,2	96,1	95,9	79,6	79,8	79,7
2.	81,0	97,1	96,9	96,8	96,6	96,5	80,2	80,1	80,4
3.	80,5	95,9	95,8	95,6	95,4	95,3	79,1	79,3	79,2
4.	81,6	97,9	97,9	97,9	97,9	97,9	81,3	81,5	81,4
5.	81,2	96,2	96,0	95,9	95,7	95,6	79,5	79,4	79,3
6.	81,6	97,9	97,9	97,9	97,9	97,9	81,6	81,3	81,7
7.	81,6	97,9	97,9	97,9	97,9	97,9	81,3	81,7	81,7
8.	80,4	96,3	96,2	96,1	95,9	95,8	79,7	79,6	79,4
9.	81,4	96,5	96,2	96,1	96,0	95,8	79,7	79,7	79,5
10.	81,6	97,9	97,9	97,9	97,9	97,9	81,5	81,3	81,3
11.	80,4	96,3	96,1	95,9	95,8	96,5	79,5	79,5	79,6
12.	80,9	96,6	96,5	96,3	96,1	95,9	79,7	79,6	79,9
13.	81,4	97,0	96,8	96,7	96,5	96,4	79,9	80,2	80,1
14.	81,6	97,9	97,9	97,9	97,9	97,9	81,6	81,3	81,7
15.	81,6	95,5	95,2	95,1	94,9	94,8	78,6	78,9	78,8
16.	81,6	97,2	96,9	96,8	96,6	96,5	80,1	80,3	80,2
17.	81,6	97,2	97,0	96,9	96,7	96,6	80,2	80,1	80,4

18.	81,6	97,4	97,2	97,1	97,0	96,8	80,3	80,5	80,4
19.	81,6	97,9	97,9	97,9	97,8	97,7	81,0	81,3	81,1
20.	81,1	96,9	96,7	96,6	96,4	96,3	79,8	80,1	80,0
Śr.	81,3	96,9	96,9	96,8	96,7	96,6	80,2	80,3	80,3

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6. Obciążenie buforów międzyoperacyjnych w trakcie procesów symulacyjnych – dla konfiguracji B

Lp.	Maksymalny stan bufora			Średni stan w buforze			Średni czas oczekiwania na obróbkę		
	BUF. 1	BUF. 2	BUF. 3	BUF. 1	BUF. 2	BUF. 3	BUF. 1	BUF. 2	BUF. 3
1.	5	15	1	0,591	3,425	0,000	77,841	456,715	0,000
2.	6	12	1	0,640	2,774	0,000	85,322	370,202	0,000
3.	6	6	1	0,614	1,490	0,000	82,359	198,710	0,000
4.	7	20	1	0,845	6,267	0,000	111,858	829,645	0,000
5.	4	8	1	0,452	1,856	0,000	60,188	245,102	0,000
6.	6	11	1	0,677	4,432	0,000	89,613	586,684	0,000
7.	6	15	1	0,764	7,910	0,000	101,102	1047,223	0,000
8.	5	7	1	0,547	1,624	0,000	73,501	218,560	0,000
9.	6	12	1	0,701	2,612	0,000	92,809	345,543	0,000
10.	7	17	1	0,694	5,728	0,000	91,829	758,296	0,000
11.	4	9	1	0,492	2,151	0,000	66,037	289,414	0,000
12.	4	14	1	0,590	3,364	0,000	78,573	450,223	0,000
13.	4	11	1	0,509	2,888	0,000	67,467	384,498	0,000
14.	6	16	1	0,797	7,402	0,000	105,456	979,990	0,000
15.	11	16	1	0,904	2,680	0,000	119,616	340,847	0,000
16.	5	14	1	0,499	3,007	0,000	66,055	392,527	0,000
17.	5	5	1	0,489	1,367	0,000	64,766	180,977	0,000
18.	5	10	1	0,676	2,689	0,000	89,534	352,446	0,000
19.	5	8	1	0,717	3,047	0,000	94,861	403,338	0,000
20.	9	11	1	0,691	2,868	0,000	91,957	383,000	0,000
Śr.	5,8	11,85	1	0,644	3,479	0,000	85,537	460,697	0,000

Źródło: opracowanie własne.

Jak wynika z przeprowadzonych analiz, konfiguracja A zapewnia wyższą płynność procesu produkcyjnego. Średnia wartość produkcji nie zakończonej wynosi 4,95 szt. (w porównaniu do wartości 8,9 szt. dla konfiguracji B), co świadczy o wyższej stabilności procesu produkcyjnego. O wyższym stopniu płynności procesu świadczy także fakt krótszego czasu oczekiwania wyrobów w buforach międzyoperacyjnych oraz niższych średnich stanach buforów międzyoperacyjnych.

W przypadku konfiguracji A występują ponadto korzystniejsze wartości obciążenia stanowisk roboczych w projektowanym systemie produkcyjnym. Jak pokazują otrzymane rezultaty, w przypadku konfiguracji A zajętość stanowisk w I etapie procesu wynosi od 94,0 do 94,8%, zaś w etapie II – 80,5%. W przypadku konfiguracji B obciążenia stanowisk wynoszą odpowiednio: Etap I: 81,3%, Etap II: od 69,6 do 96,9%, Etap III: od 80,2% do 80,3%. Biorąc pod uwagę fakt, iż cena każdej z obrabiarek tworzących podsystem wytwarzania RSP wynosi często kilka milionów złotych, wyższe planowane obciążenie jest zjawiskiem pozytywnym – pozwala bowiem na redukcję nieefektywnych (i nieekonomicznych) mocy produkcyjnych. Z drugiej zaś strony kilkuprocentowe rezerwy stanowią bufor bezpieczeństwa dla nieprzewidywanych awarii maszyn technologicznych wchodzących w skład systemu.

W konsekwencji na podstawie przeprowadzonej całościowej analizy należy stwierdzić, iż preferowaną konfiguracją dla projektowanego systemu jest konfiguracja A zaprezentowana na rys. 7. Proces produkcyjny realizowany będzie w dwóch etapach, gdzie w pierwszym etapie – na 6 obrabiarkach wielozadaniowych następować będzie realizacja pierwszych czterech operacji technologicznych, w drugim zaś etapie – na 3 obrabiarkach realizowana będzie operacja szlifierska.

Podsumowanie

Projektowanie systemów wytwórczych jest działaniem strategicznym w każdym z przedsiębiorstw produkcyjnych. Jest to spowodowane zarówno długookresowym charakterem przedsięwzięcia (czas życia systemu to kilka, a czasami nawet kilkanaście lat), jak i wysokimi kosztami inwestycyjnymi. Ciągłe zmieniające się warunki rynkowe – przejawiające się m.in. w skracających się cyklach życia wyrobów, zmiennością rynkową oraz nieustającą presją redukcji kosztów wytwarzania – nakładają konieczność poszukiwania nowych form organizacji systemów produkcyjnych umożliwiających elastyczną produkcję przy niskich kosztach wytwarzania.

W procesie projektowania systemów wytwórczych elementem o kluczowym znaczeniu pozostaje właściwe planowanie zdolności produkcyjnych systemu – zdolność produkcyjna jest bowiem tym czynnikiem, który z jednej strony decyduje o możliwości zaspokojenia istniejącego popytu, z drugiej zaś jest jednym z czynników mających kluczowy wpływ na koszt wytwarzania wyrobu (m.in. poprzez koszty amortyzacji maszyn i urządzeń technologicznych wchodzących w skład systemu).

W niniejszym artykule przedstawiono metodę wyboru konfiguracji struktury dla projektowanego rekonfigurowalnego systemu dedykowanego dla obróbki wyrobów klasy walek. Na podstawie procesu technologicznego wyrobu reprezentanta dokonano kalkulacji liczby niezbędnych maszyn technologicznych oraz liczby możliwych konfiguracji RSP. Dzięki podzieleniu struktury systemu na dwa podsystemy dokonano redukcji możliwych konfiguracji z 256 do 26 sztuk. Szczegółowa analiza wyszczególnionych rozwiązań pozwoliła stwierdzić, iż tylko dwie spośród możliwych konfiguracji dają możliwość produkcji z wymaganym taktiem, co umożliwiło dalszą selekcję w procesie wyboru. Finalny wybór struktury systemu został wykonany w oparciu o analizę przepływu i obciążenia maszyn technologicznych wchodzących w skład systemu, zrealizowanych metodą symulacji komputerowej, z wykorzystaniem oprogramowania Enterprise Dynamics. Chociaż zaprezentowana analiza została przeprowadzona dla konkretnego przykładu – sama metodologia wyboru ma charakter uniwersalny i może zostać wykorzystana w przypadku projektowania dowolnego systemu klasy RSP.

Bibliografia

- Bi Z., Lang S., Shen W., *Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art*, „International Journal of Production Research” 2008, Vol. 46, No. 4, s. 967–992.
- Brzeziński M., *Organizacja produkcji w przedsiębiorstwie*, Wyd. Difin, Warszawa 2013.
- Brzeziński M., *Zintegrowane organizacje oparte na wiedzy*, Wyd. Difin, Warszawa 2018.
- Burduk A., *Modelowanie systemów narzędziem oceny stabilności procesów produkcyjnych*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- Dudek M., *Szczupłe systemy wytwarzania*, Wyd. Difin, Warszawa 2016.
- Durlik I., Santarek K., *Inżynieria zarządzania III. Naukowe, techniczne i inwestycyjne przygotowanie produkcji wyrobów wysokiej techniki*, Wyd. C.H. Beck, Warszawa 2016.
- Esmacilian B., Behdad S., Wang B., *The evolution and future of manufacturing: A review*, „Journal of Manufacturing Systems” 2016, Vol. 39, s. 79–100.
- Gawlik J., Plichta J., Świć A., *Procesy produkcyjne*, PWE, Warszawa 2013.
- Gola A., *Procesy produkcji w zautomatyzowanych systemach produkcyjnych (ZSP) [w:] Nowoczesne zarządzanie produkcją. Ujęcie procesowe*, Szatkowski K. (red.), PWN, Warszawa 2014.
- Gola A., Szatkowski K. (red.), *Economic Aspects of Manufacturing Systems Design*, „Actual Problems of Economics” 2014, 156 (6), s. 205–212.
- Gola A., *Strategie planowania zdolności produkcyjnych współczesnych systemów wytwórczych [w:] Matuszek J. (red.), Inżynieria produkcji, zarządzanie procesami produkcyjnymi*, Wyd. ATH w Bielsku-Białej, Bielsko Biała 2018, s. 9–22.
- Inżynieria produkcji. Kompendium wiedzy*, red. Knosala R., 2017, PWE, Warszawa.
- Koren Y., Heisel U., Jovane F., Pritschow G., Ulsoy G., Van Brussel, H., *Reconfigurable Manufacturing Systems*, CIRP Annals 1999, Vol. 48, Issue 2, s. 527–540.
- Koren Y., Arbor A., Kota S., United States Patent, nr US 6 349 237 z dnia 19 lutego 2002.
- Lewandowski J., Skolud B., Plinta D., *Organizacja systemów produkcyjnych*, PWE, Warszawa 2014.
- Liwowski B., Kozłowski R., *Podstawowe zagadnienia zarządzania produkcją*, Oficyna Wyd. Wolters Kluwer business, Warszawa 2011.
- Łapuńska I., Marek-Kołodziej K., Wittbrodt P., *Elastyczne systemy wytwórcze – rozwój w kierunku cyfrowej produkcji [w:] Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, red. Knosala R., Oficyna Wyd. Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole 2017, s. 732–740.
- Mehrabi M., Ulsoy G., Koren Y., *Reconfigurable manufacturing systems: Key to Future Manufacturing*, „Journal of Intelligent Manufacturing” 2000, Vol. 11, No. 4, s. 403–419.
- Pająk E., *Zarządzanie produkcją. Produkt, technologia, organizacja*, PWN, Warszawa 2006.
- Plinta D., Więcek D., *Production Systems Design*, Wyd. Naukowe ATH w Bielsku Białej, Bielsko-Biała 2012.
- Relich, M., Pawlewski, P., *A fuzzy weighted average approach for selecting portfolio of new product development projects*, „Neurocomputing” 2017, Vol. 231, s. 19–27.

- Rojko A., *Industry 4.0 Concept: Background and Overview*, „International Journal of Interactive Mobile Technologies” 2017, Vol. 11, No. 5, s. 77–90.
- Styś A., Dejnaka A., *Innowacje w biznesie*, Wyd. Difin, Warszawa 2018.
- Waters D., *Zarządzanie operacyjne. Towary i usługi*, PWN, Warszawa 2001.
- Więcek D., *Wpływ czynników kosztotwórczych na szacowanie kosztów produkcji elementów maszyn*, „Organizacja i zarządzanie: Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej” 2017, z. 101, s. 533–544.

SUMMARY

Arkadiusz Gola

Investigation of production system configurations with respect to determination of optimum production capacity

This paper investigates a production system configuration with respect to the use of technological machines that make part of this system. The investigation involved the design of a reconfigurable production system for manufacturing shafts. Based on input data, the number of necessary technological machines (machine tools) is defined, system configurations ensuring the required rate of production yield are developed and selected solutions (configurations) are analyzed. The production system was assessed based on numerical simulation results obtained with Enterprise Dynamics.

Key words: manufacturing process, capacity, reconfigurable manufacturing system, manufacturing systems configuration.

Data wpływu artykułu: 16.04.2018 r.

Data akceptacji artykułu: 23.05.2018 r.