



MODUŁOWA BUDOWA PRODUKTÓW JAKO SZANSA NA UZYSKANIE OSZCZĘDNOŚCI W PRZEDSIĘBIORSTWACH PROJEKTUJĄCYCH I WYTWARZAJĄCYCH NA ZAMÓWIENIE

Janusz Mleczek, Łukasz Byrdy, Bartosz Cieśla, Karolina Kłaptocz

Katedra Inżynierii Produkcji, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Poland

Corresponding author:

Janusz Mleczek

Katedra Inżynierii Produkcji

Akademia Techniczno-Humanistyczna

Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Poland

phone: (+48) 33 8279326

e-mail: jmleczek@ath.bielsko.pl

MODULAR CONSTRUCTION OF PRODUCTS AS AN OPPORTUNITY TO INCREASE COST-EFFECTIVENESS IN ENGINEERING TO ORDER COMPANIES

ABSTRACT

This article presents the results of research conducted within a medium-sized company specializing in designing and producing mechanical appliances upon request. The authors investigated potential manufacturing costs savings per-unit, obtained as a result of changing production strategy from single unit to micro batch production. The research was inspired by concept of product modularity in terms of Mass Customization strategy. Since products redesigning along with this concept, under conditions of engineer-to-order companies is a difficult and time consuming process, the authors purpose was to highlight its potential manufacturing benefits in real production system. This research gave universal benchmark for engineer-to-order companies, hesitating whether to begin transition to mass customizer. While supervising the production system, a series of experiments has been carried out in order to analyze time reduction of production cycle for per-unit manufacturing of mechanical parts in single unit production and micro batch of three pieces.

KEYWORDS

Make-to-order, mass customization, mass individualization, product modularity, production effectiveness.

1. Wprowadzenie

Zmieniające się wymagania i potrzeby klientów oraz postęp techniczno-technologiczny wywierają istotny wpływ na filozofię prowadzenia działalności produkcyjnej. Pierwsze przeobrażenie z produkcji rzemieślniczej do przemysłowej umożliwiło rozpoczęcie wytwarzania produktów na masową skalę [13]. Standaryzacja i automatyzacja stanowiące podstawę produkcji masowej pozwoliły na redukcję kosztów wytwarzania produktów oraz ich ceny. Wraz z nadejściem końca XX wieku i wzrostem dynamiki otoczenia rynkowego towary produkowane masowo przestały spełniać oczekiwania klientów stawiających coraz wyższe wymagania. Strategia masowej kustomizacji (*Mass Customization*) stanowi odpowiedź na nowe wymagania rynkowe łącząc w sobie cechy charakterystyczne dla produkcji rzemieślniczej oraz masowej – oferuje produkty po cenie produkcji masowej uwzględniając równocześnie indywidualne potrzeby klienta. Jest to połączenie konkurowania opartego na kosztach oraz różnicowaniu [3]. Masową kustomizację można opisać za pomocą koncepcji 5A – *anything, anybody, any volume, anywhere, anytime* – co

można tłumaczyć jako dostarczenie dowolnego produktu każdemu, w dowolnej liczbie, miejscu oraz czasie [11]. Wprowadzenie pojęcia masowej indywidualizacji do literatury przypisuje się S.M. Davisowi, który zdefiniował ją jako sytuację, w której „może zostać osiągnięta tak samo duża liczba klientów jak na rynkach masowych epoki ekonomii przemysłowej, przy jednoczesnym traktowaniu ich w sposób zindywidualizowany, charakterystyczny dla rynków ekonomii przedprzemysłowej” [7].

2. Istotność budowy modułowej produktów

Modułowa budowa produktów stanowi ważny aspekt w kontekście realizacji produkcji w mikroseriach. Jest to strategiczne podejście do wytwarzania produktu polegające na podziale go na niezależne komponenty, zwane modułami [4]. Innowacje w technologiach wytwarzania produktów w połączeniu z rosnącym popytem na produkty dostosowane do indywidualnych potrzeb klientów spowodowały wzrost zainteresowania firm tematem modułowości w budowie produktów. Wy-

nika to z faktu, że może się ona przyczyniać do wzrostu zdolności konkurencyjnych przedsiębiorstw [1] oraz wpływać pozytywnie na możliwości masowego dostosowywania produktów [2].

Literatura dotycząca modułowej budowy produktów skupia się na różnych aspektach zagadnienia i dotyczy różnych cech produktów. Oddzielność (*separateness*) dotyczy stopnia w jakim istnieje możliwość demontażu i łączenia nowych konfiguracji produktu bez utraty jego funkcjonalności [12]. Specyfika (*specificity*) odnosi się do stopnia niepowtarzalności funkcji pełnionych przez komponenty, natomiast możliwość przeniesienia (*transferability*) do możliwości ich ponownego wykorzystania w innym produkcie [8].

Przed przystąpieniem do realizacji wariantu produkcji ETO-MC (przedsiębiorstwa projektujące i wytwarzające produkty na zamówienie klienta realizujące strategię masowej kustomizacji) warto przeanalizować stopień podobieństwa elementów składowych wyrobów. Autorzy pracy w publikacji [10] zaproponowali metodę obliczeń oraz przeprowadzili przykładową analizę zjawiska powtarzalności części produkowanego asortymentu. Stosowanie tego typu analiz pozwala na uniknięcie zjawiska „pułapki złożoności”, która może dotyczyć przedsiębiorstw, które rozpoczęły realizację strategii masowej kustomizacji. Dotyczy ona nieproporcjonalnego wzrostu stosunku kosztów wprowadzenia złożoności produktowej do przychodów uzyskanych z ich sprzedaży a w dalszej konsekwencji do obniżenia zysków przedsiębiorstwa.

3. Cel badań

Głównym celem badań jest zweryfikowanie skali oszczędności wynikających z przejścia z systemu produkcji jednostkowej na mikroseryjną. W tym celu przeprowadzono w warunkach rzeczywistego systemu produkcyjnego, w latach 2016-2018, serię eksperymentów polegającą na wytwarzaniu wytypowanych komponentów w sposób jednostkowy i w mikro serii 3 sztuk. Autorzy pracy na podstawie swojego doświadczenia zawodowego, spodziewali się w ten sposób uzyskać oszczędności w całkowitym jednostkowym czasie produkcji na poziomie 20%. Tak wysoki potencjalny poziom redukcji pracochłonności miałyby stanowić zachętę dla systemów produkcji jednostkowej, projektujących i wytwarzających na zamówienie, do przejścia na strategię hybrydową MC-ETO. Z racji, że podobne badania zostały zrealizowane kilkanaście lat temu, przez zespół niemieckich naukowców [5], celem pobocznym badań jest weryfikacja w analizowanych warunkach praktyki produkcyjnej, opisanego przez nich fenomenu wprawy pracownika (ang. *training effect*). Fenomen ten polega na redukcji czasu wykonywania tej samej pracy, dla kolejnych sztuk w serii produkcyjnej. Według badań przeprowadzonych przez autorów tamtej pracy, jak również innych badań, na które się powołują, oszczędność czasu wynikającą z efektu wprawy można obliczyć za pomocą wzoru (1):

$$t_{nj}^k = t_{n1}^k \left(\frac{1-t_E}{j^{0,322}} + t_E \right) = t_{n1}^k \left(\frac{0,685}{j^{0,322}} + 0,315 \right), \quad (1)$$

gdzie t_{nj}^k oznacza czas jednostkowy przetwarzania n -tej operacji technologicznej, k -tego komponentu, dla j -tej sztuki w serii, t_E – nieredukowalna część czasu przetwarzania pierwszej sztuki w serii.

4. Opis badań oraz zebrane dane

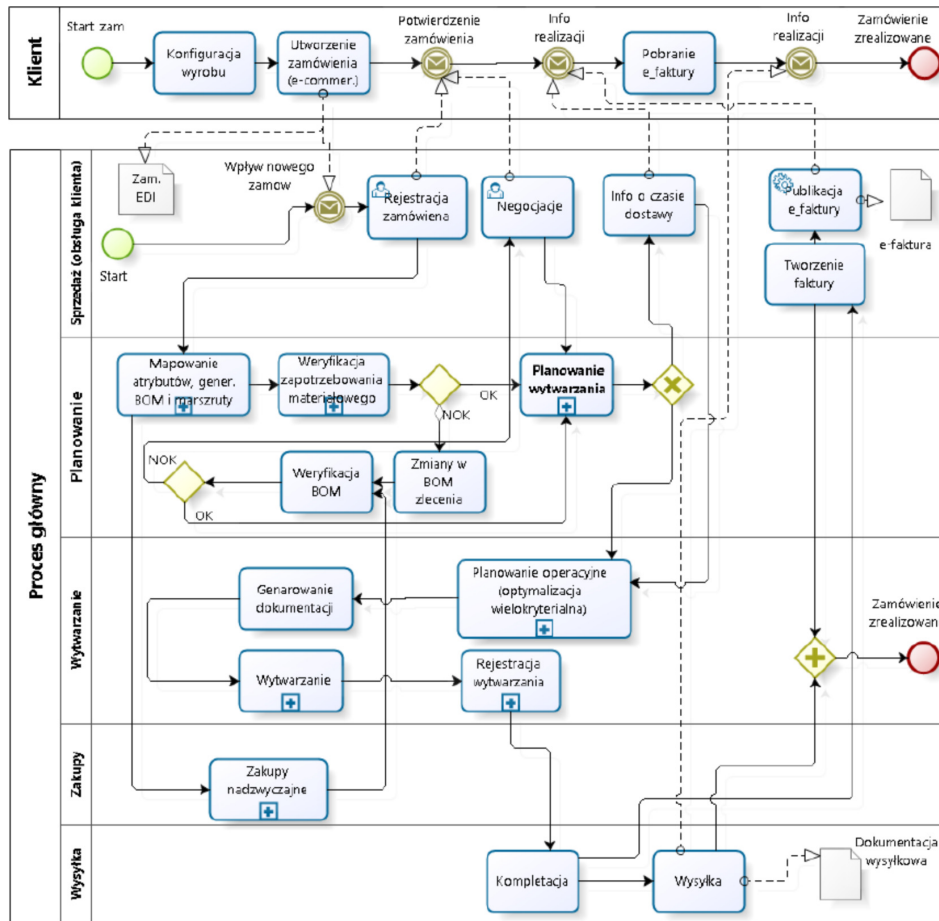
Proces planowania i realizacji produkcji wałów oraz kół zębatych jest realizowany zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1, który jest charakterystyczny dla firm produkujących jednostkowo. Proces produkcyjny koła zębatego oraz wału zębatego cechuje wysoki stopień komplikacji. Podczas wytwarzania tego typu elementów konieczne jest wykonanie uzębienia co wymaga użycia specjalistycznych obrabiarek, narzędzi oraz przyrządów pomiarowych. Należy tutaj również wspomnieć o wykwalifikowanej kadrze pracownicz, która zajmuje się obsługą obrabiarek oraz przyrządów pomiarowych [6].

Badania zostały przeprowadzone na elementach wykonanych zgodnie z procesami produkcyjnymi przedstawionymi w tabelach 1 i 2.

Pokrywką to części z powierzchniami płaskimi, najczęściej o prostych kształtach, których proces produkcyjny przedstawiony w tabeli 3 nie jest szczególnie skomplikowany.

Badania zrealizowano poprzez serię eksperymentów, polegających na zleceniu wytwarzania tego samego komponentu w liczbie 1 sztuki i mikro serii 3 sztuk. Następnie zapisywano w arkuszu kalkulacyjnym sumaryczny rzeczywisty czas przetwarzania zarchiwizowany w systemie klasy ERP, poprzez narzędzie do rejestracji czasu pracy na hali produkcyjnej. Rejestracja odbywała się w systemie start/stop, a więc pracownicy produkcyjni odnotowywali zarówno rozpoczęcie, jak i zakończenie wykonywanej pracy. Do badania wyznaczono we współpracy z ekspertami z przedsiębiorstwa 3 grupy wytwarzanego asortymentu, które podzielono następnie na 2 podgrupy ze względu na masę gotowego komponentu, zgodnie z tabelą 4. Zabieg ten wykonano w celu uzyskania podgrup o jednolitym procesie technologicznym, realizowanym na podobnych lub wręcz tych samych gniazdach produkcyjnych.

Zrealizowano w sumie 53 pary eksperymentów, których wyniki przedstawiono w tabeli 5. Poszczególne skróty w nagłówkach kolumn oznaczają następująco: masa – wielkość wyrażona w kilogramach; T_{pz} – sumaryczny czas przygotowawczo-zakończeniowy wszystkich operacji technologicznych w cyklu produkcyjnym komponentu, wynikający z czasów technologicznych w marszrutach produkcyjnych, wyrażony w godzinach; $T_{1szt.}$ – zarejestrowany rzeczywisty, całkowity czas produkcji komponentu w ilości 1 sztuki, wyrażony w godzinach; $T_{3szt.}$ – zarejestrowany rzeczywisty, całkowity czas produkcji komponentu w ilości 3 sztuki, wyrażony w godzinach.



Rys. 1. Proces główny planowania i realizacji produkcji [9].

Tabela 1
Proces produkcji koła zębatego.

Numer operacji	Opis
10	Cięcie pręta na określoną długość
20	Obróbka zgrubna wszystkich powierzchni
30	Wykonanie otworu na gotowo
40	Dłutowanie rowka wpustowego
50	Obróbka kształtująca powierzchnie zewnętrzne
60	Nacięcie zębów
70	Obróbka wykańczająca zębów
80	Kontrola jakości

Tabela 2
Proces produkcji wału zębatego.

Numer operacji	Opis
10	Cięcie materiału na określoną długość
20	Wykonanie nakiełków
30	Obróbka zgrubna
40	Obróbka kształtująca
50	Toczenie powierzchni stożkowych i kształtowych
60	Nacięcie zębów
70	Obróbka wykańczająca zębów
80	Frezowanie rowków wpustowych
90	Obróbka wykańczająca
100	Kontrola jakości

Tabela 3
Proces produkcji pokryw.

Numer operacji	Opis
10	Obróbka zgrubna powierzchni płaskich
20	Obróbka kształtująca powierzchni paskich
30	Obróbka wykańczająca powierzchni płaskich
40	Wykonanie otworów oraz gwintowanie
50	Malowanie
60	Kontrola jakości

Tabela 4
Komponenty podlegające badaniu.

Asortyment	I podgrupa	II podgrupa
Wałki zębate	≤ 10 kg	>10 kg
Koła zębate	≤ 20 kg	>20 kg
Pokrywki	≤ 10 kg	>10 kg

Następnie zgodnie z pobocznym celem badań, korzystając z fundamentalnej zależności czasu jednostkowego przetwarzania i czasu przygotowawczo-zakończeniowego według wzoru (2), przekształcono wzór (1) na (32). Na jego podstawie wykonano analizę wartości współczynnika t_E dla zaprojektowanych podgrup asortymentu

$$T_{prod,i}^k = \sum_{n=1}^m t_{p_n}^k + i \cdot \sum_{n=1}^m t_{j_n}^k = T_{p_z}^k + i \cdot T_{j^k}, \quad (2)$$

Tabela 5

Dane zebrane podczas przeprowadzania badań.

WAŁKI ZĘBATE I podgrupa				KOŁA ZĘBATE I podgrupa				POKRYWKI I podgrupa			
masa	Tpz	T1szt.	T3szt.	masa	Tpz	T1szt.	T3szt.	masa	Tpz	T1szt.	T3szt.
0,3	4,65	7,40	12,53	1,3	4,2	8	14,04	1	0,75	2,41	5,59
2,2	4,06	6,44	13,23	1,3	4,22	4,54	10,06	1	0,92	1,22	2,48
2,6	4,56	10,13	14,99	1,65	5,84	7,43	20,69	2	0,75	3,39	6,3
2,7	7,73	12,52	20,97	3,8	5,34	9,8	19,86	4	0,75	1,63	3,05
3	4,41	6,82	16,32	4,8	5,44	9,8	17,62	4	1,48	3,02	5,65
3,8	4,50	9,15	18,02	5,7	5,28	9,51	14,78	5	0,72	1,75	4,68
3,9	4,41	9,70	18,73	7,5	4,5	9,99	19,9	5	0,75	2,11	4,7
4,4	7,75	16,55	28,74	8,5	6,28	9,88	19,09	6	1,4	3,02	6,83
5,5	4,35	12,52	23,27	11,25	6,29	11,49	23,79	7	0,75	1,72	3,96
9	3,88	11,16	23,24	15	5,33	13,42	27,79	9	1,72	5,68	9,34
				18,6	1,865	16,95	31,981				
				19,3	6,38	15,11	31,69				
WAŁKI ZĘBATE II podgrupa				KOŁA ZĘBATE II podgrupa				POKRYWKI II podgrupa			
masa	Tpz	T1szt.	T3szt.	masa	Tpz	T1szt.	T3szt.	masa	Tpz	T1szt.	T3szt.
12	4,15	10,45	17,88	24	6,12	13,87	30,81	11	1,1	4,19	6,44
13	8,11	13,79	30,61	30	5,43	18,4	36,17	11	1,1	5,89	16,32
18	8,15	16,48	32,33	34	8,39	23,9	53,24	12	1,75	4,9	12,09
23	7,52	26,13	76,28	40	6,13	21,67	44,84	20	3,72	7,25	15,83
26	4,80	15,17	36,07	56	7,2	21,26	44,24	20	1,72	4,18	10,35
27	5,23	14,38	36,13	60	6,31	17,35	38,36	21	3,72	8,49	18,14
27	4,68	14,19	23,09	80	6,31	15,68	40,04	21	2,47	8,11	18,9
38	6,45	22,19	54,06	109	4,28	11,56	32,03	22	1,77	9,27	21,48
45	7,55	22,32	47,86	142	6,8	26,88	63,01	35	1,07	7,36	13,77
98	6,35	25,32	44,71	181	4,59	25,26	66,1	42	1,13	6,92	16,22
				244	5,8	19,4	52,85				

gdzie $Tprod_i^k$ – całkowity czas cyklu produkcyjnego k -tego komponentu w serii i -sztuk, tpz_n^k – czas przygotowawczo-zakończeniowy n -tej operacji technologicznej, k -tego komponentu, tj_n^k – czas jednostkowy przetwarzania n -tej operacji technologicznej, k -tego komponentu, m – liczba operacji technologicznych w cyklu produkcyjnym k -tego komponentu, i – liczba sztuk w serii produkcyjnej, Tpz^k – suma czasów przygotowawczych k -tego komponentu, Tj^k – suma czasów jednostkowych przetwarzania k -tego komponentu

$$\overline{T3szt.^p} = \overline{Tpz^p} + \sum_{j=1}^3 (\overline{T1szt.^p} - \overline{Tpz^p}) \left(\frac{1-t_E}{j^{0,322}} + t_E \right), \quad (3)$$

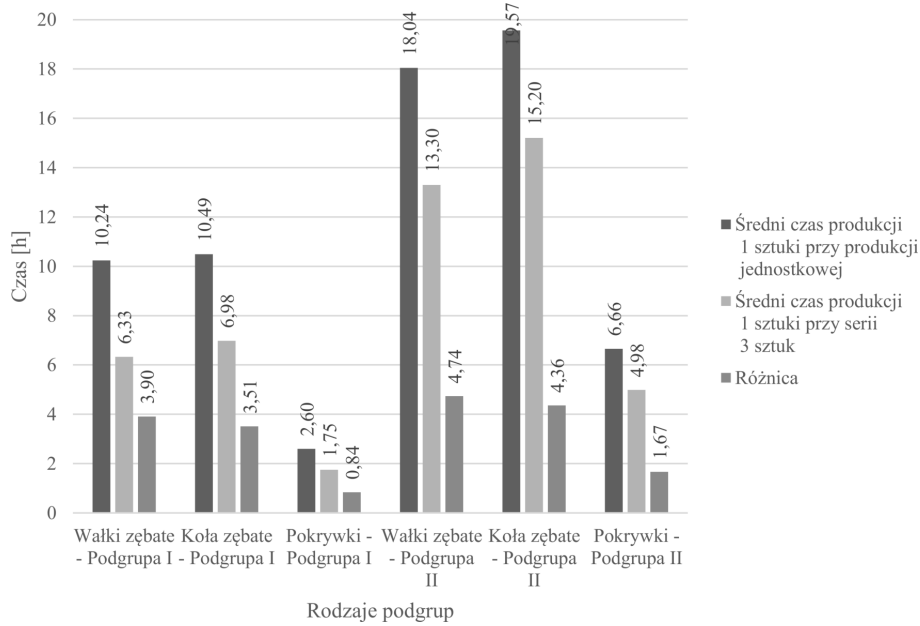
gdzie $\overline{T3szt.^p}$ – średni dla p -tej podgrupy asortymentu, zmierzony sumaryczny czas produkcji serii 3 sztuk, $\overline{T1szt.^p}$ – średni dla p -tej podgrupy asortymentu, zmierzony sumaryczny czas produkcji 1 sztuki, $\overline{Tpz^p}$ – średni dla p -tej podgrupy asortymentu sumaryczny czas przygotowawczo-zakończeniowy wszystkich operacji technologicznych w cyklu produkcyjnym.

5. Analiza danych

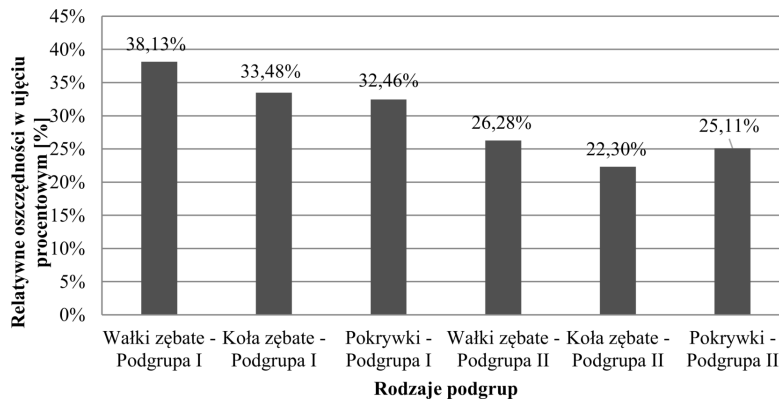
Na rysunku 2 przedstawiono uzyskane czasy produkcji dla każdej podgrupy z badania. Z zebranych da-

nych wynika, że największy czas produkcji przypada na koła i wałki zębate z podgrupy II. Wynika to z dużego stopnia skomplikowania procesu wytwarzania tych elementów, który składa się zazwyczaj z co najmniej 16 operacji technologicznych. Co więcej, gabaryty elementów z podgrupy drugiej determinują większe czasy jednostkowe przetwarzania dla poszczególnych operacji technologicznych. Właśnie dla tych podgrup asortymentu uzyskano również największą różnicę w czasie produkcji między jedną sztuką przy produkcji jednostkowej a jedną sztuką przy serii 3 sztuk. Z drugiej strony zarówno najkrótszy czas produkcji, jak i różnica przypada na pokrywki, których proces technologiczny jest stosunkowo najprostsz (zazwyczaj 4 lub 5 operacji technologicznych).

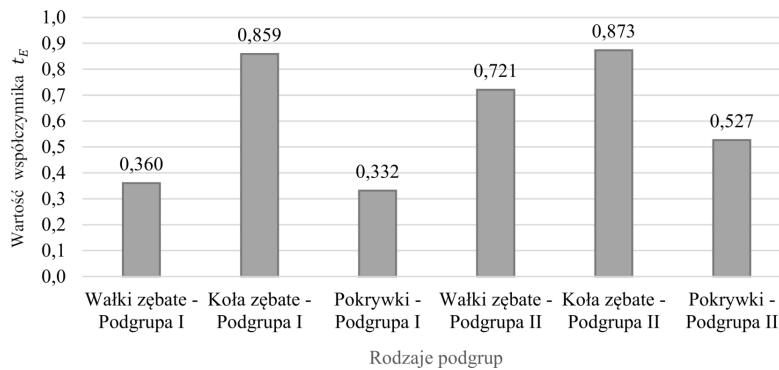
W kolejnym kroku przeprowadzono analizę wartości względnych. Jak zaprezentowano na rysunku 3 największą oszczędność czasu osiągnięto przy produkcji w serii 3 sztuk wałków zębatach z podgrupy I (38,13%). Nie wiele mniejszą oszczędność uzyskuje się dla kół zębatach i pokrywek z podgrupy pierwszej (kolejno 33,48% oraz 32,46%). Na drugim końcu skali znajdują się koła zębata z podgrupy drugiej (22,30%), co wynika z fakty relatywnie małego udziału czasów przygotowawczo-zakończeniowych w całkowitym czasie cyklu produkcyjnego.



Rys. 2. Czasy produkcji uzyskane dla każdej z podgrup.



Rys. 3. Oszczędności dla każdej podgrupy w ujęciu procentowym.



Rys. 4. Wartości współczynnika t_E .

Przedstawione wykresy są przykładem służącym zobrazowaniu, ile można zaoszczędzić produkując w zwiększonych seriach, komponenty dla produktów o budowie modułowej. Dzięki zastosowaniu takiego typu produkcji można wytwarzać taniej i szybciej, co w konsekwencji powinno wpłynąć na wzrost konkurencyjności przedsiębiorstwa.

W ostatnim kroku przeprowadzono analizę współczynnika t_E (nieredukowalna część czasu przetwarzania

pierwszej sztuki w serii) dla zebranych danych. W celu realizacji obliczeń dokonano przekształcenia wzoru (3) na (4). Obliczone wartości współczynnika t_E przedstawiono na rysunku 4

$$t_E = 2,016 \cdot \frac{T_{3szt.P} - T_{pz}^P}{T_{1szt.P} - T_{pz}^P} - 5,048. \quad (4)$$

Największe wartości uzyskano dla kół zębatach z podgrupy pierwszej oraz drugiej (0,859 oraz 0,873),

natomiast najmniejsze dla wałków zębatych z podgrupy I oraz pokrywek z podgrupy I (0,360 oraz 0,332). Porównując otrzymane wyniki z wartością 0,315 z [5]. Można zauważyć, że w analizowanych warunkach jest ona odpowiednia dla komponentów o stosunkowo niewielkich jednostkowych czasach przetwarzania. Dla pozostałych podgrup asortymentu otrzymano diametralne różnice w wartościach współczynnika t_E .

6. Wnioski

Wzrost seryjności wytwarzania w systemach produkcji jednostkowej, a takimi są najczęściej systemy ETO, jest zagadnieniem nietrywialnym. Jednym z jego możliwych rozwiązań jest wprowadzenie w przedsiębiorstwie modułowej budowy produktów finalnych, zgodnie z zasadami strategii MC. Proces taki wymaga kompleksowego podejścia do zagadnień projektowania, planowania produkcji, wytwarzania i magazynowania półproduktów i wyrobów gotowych. Wszystko powyższe wymaga bardzo dużych nakładów pracy i wyjścia ze strefy komfortu menadżerów odpowiedzialnych za poszczególne obszary. Jednak, jak zaprezentowano w niniejszej pracy, wysiłek ten może być bardzo opłacalny, generując w przyszłości znaczną redukcję czasów wytwarzania. Analizując wartości współczynnika t_E wskazano również, że skala możliwych do uzyskania oszczędności waha się w zależności od specyfiki procesów wytwarzania. W związku z powyższym, właściwym wydaje się kontynuowanie badań dla innych systemów produkcyjnych, jak również innych branż produktowych.

Literatura

- [1] Antonio K.W., Yam R., Tang E., *Supply chain integration and product modularity an empirical study of product performance for selected Hong Kong manufacturing industries*, Journal of Operation & Production Management, 30, 1, 20–56, 2010.
- [2] Bask A., Lipponen M., Rajahonk M., Tinnilä M., *Framework for modularity and customization: service perspective*, Journal of Business & Industrial Marketing, 26, 5, 306–319, 2011.
- [3] Da Silveira G., Borenstein D., Fogliatto F.S., *Mass customization: Literature re- view and research directions*, International Journal of Production Economics, 72, 1, 1–13, 2001.
- [4] Danese P., Filippini R., *Direct and Mediated Effects of Product Modularity on Development Time and Product Performance*, IEEE Transactions on Engineering Management, 60, 2, 2013.
- [5] Ehrlenspiel K., Kiewert A., Lindemann U., *Factors that influence manufacturing costs and procedures for cost reduction*, Cost-Efficient Design, p. 143–384, 2007.
- [6] Feld M., *Podstawy projektowania procesów technologicznych typowych części maszyn*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.
- [7] Haug A., Ladeby K., Edwards K., *From engineer-to-order to mass customization*, Management Research News, 32, 7, 2009.
- [8] Mikkola J.H., *Capturing the degree of modularity embedded in product architectures*, Journal of Product Innovation Management, 23, 2, 128–46, 2006.
- [9] Mleczo J., *Planowanie produkcji jednostkowej i małoseryjnej w MŚP*, Wydawnictwo Fundacji Centrum Nowych Technologii, Bielsko-Biała, 2018.
- [10] Mleczo J., Byrdy Ł., Cieśla B., Kłaptocz K., *Ocena stopnia podobieństwa elementów składowych wyrobów produkowanych w systemie na zamówienie – studium przypadku*, Inżynieria Zarządzania: Cyfryzacja Produkcji. Aktualności Badawcze 2, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, s. 297–306, 2020.
- [11] Pine II B.J., Bart V., Boynton A.C., *Making mass customization work*, Harvard Business Review, 75, 5, 108–118, 1993.
- [12] Schilling M.A., *Toward a general modular systems theory and its application to interfirm product modularity*, Academy of Management Review, 25, 2, 312–34, 2000.
- [13] Świć A., Gola A., *Directions of manufacturing systems' evolution from the flexibility level point of view*, Innovations in Management and Production Engineering, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, s. 226–238, 2012.