

Ocena technologiczności konstrukcji montażu według zmodyfikowanej metody Boothroyda & Dewhursta DFA

Assessment of design manufacturability in assembly processes by modified Boothroyd & Dewhurst DFA method

JÓZEF MATUSZEK
TOMASZ SENETA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.7.53>

Przedstawiono problem oceny technologiczności konstrukcji wyrobów z punktu widzenia kryterium przebiegu operacji montażu (*design for assembly* – DFA). Podano przebieg oceny technologiczności konstrukcji złożonego wyrobu na przykładzie metody Boothroyda & Dewhursta. Przebieg zilustrowano przykładem.

SŁOWA KLUCZOWE: procesy montażu, technologiczność konstrukcji.

Paper presents the problem of evaluating manufacturability of product design. The issue was described from the point of view of course of assembly operations implementation criterion (Design for Assembly – DFA). Technological assessment of the complex product structure flow is given using Boothroyd & Dewhurst method. Presented flow of the proceedings is illustrated by an example.

KEYWORDS: assembly processes, design manufacturability

Wprowadzenie

Określenie konsekwencji decyzji projektowych ma decydujące znaczenie w ocenie efektywności i skuteczności projektowania procesów i systemów produkcyjnych [7]. Do oceny technologiczności montażu stosuje się różne metody [1–7, 9]. W przemyśle motoryzacyjnym uznanie zdobyły metody DFA (*design for assembly* – projektowanie dla montażu). Wykorzystanie metod DFA pozwala uzyskać prostszą konstrukcję, z mniejszą liczbą części składowych [6, 7, 10]. Najbardziej rozpowszechnione są metody Lucas DFA i Boothroyda & Dewhursta (B&D) DFA [2, 3, 8]. Metodę Lucas DFA opisano w publikacji [7]. W opracowaniu przedstawiono możliwości zastosowania i modyfikacji metody B&D.

Metoda Boothroyda & Dewhursta DFA

Metoda B&D została opracowana pod koniec 1970 r. [2]. W kolejnych latach była doskonalona dzięki nowym metodom i technikom analiz. Analiza nie jest wykorzystywana do opracowania projektu; służy do oceny i udoskonalania istniejącej struktury zaprojektowanego wyrobu. Najczęściej jest stosowana do oceny prototypu przed wdrożeniem go do produkcji [2].

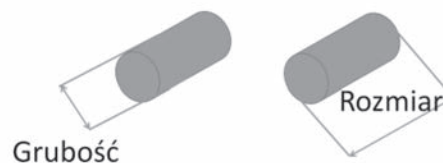
Metoda B&D ma osiem wytycznych dotyczących projektowania procesu montażu:

- zmniejszenie liczby komponentów (zespołów, części),
- eliminacja korekt po operacjach montażu,

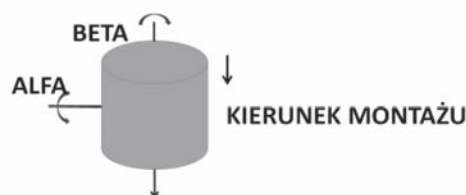
- zaprojektowanie jak największej liczby komponentów wyrobu (zespołów, części) samopozycjonujących i samoosadzających się,
- zapewnienie odpowiedniego dostępu oraz nieograniczonego pola widzenia,
- zapewnienie łatwości montowania komponentów,
- minimalizacja konieczności reorientacji komponentów podczas montażu,
- maksymalizacja liczby komponentów, które nie mogą zostać zamontowane niepoprawnie,
- maksymalizacja liczby komponentów charakteryzujących się symetrią (jeśli to możliwe) lub (jeśli nie) wyraźnie asymetrycznych.

Należy jednak zwrócić uwagę, że zmniejszenie liczby elementów składowych wyrobu może doprowadzić do zwiększenia stopnia ich złożoności i podniesienia kosztów ich wytwarzania.

Na pierwszym etapie analizy montażu ustala się dla każdej części dwa charakterystyczne parametry: grubość i rozmiar – rys. 1 i 2.



Rys. 1. Określanie grubości (średnicy) i rozmiaru (długości) [2]



Rys. 2. Określanie kątów ALFA i BETA [2]

Grubość jest długością najkrótszej strony najmniejszego prostopadłościanu, który otacza dany element. Rozmiar jest długością najdłuższego boku najmniejszego prostopadłościanu, który może otoczyć część [2].

Na rys. 2 zaznaczono kąty BETA i ALFA. Kąt ALFA określa symetrię części wokół osi prostopadłej do kierunku wkładania. Kąt BETA – symetrię części wokół osi równoległej do kierunku wkładania [2]. Na podstawie wartości grubości i rozmiarów oraz kątów określone są wskaźniki

* Prof. dr hab. inż. Józef Matuszek, jmatuszek@ath.bielsko.pl, <https://orcid.org/0000-0003-1668-6329> – Katedra Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała, Polska
Mgr inż. Tomasz Seneta, kip@ath.bielsko.pl – Katedra Inżynierii Produkcji, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Akademia Techniczno-Humanistyczna, Bielsko-Biała, Polska

czasu manipulowania i czasu osadzania w operacjach montażowych. Wykorzystuje się w tym celu tabele przygotowane przez Boothroyda i Dewhursta.

Wskaźnik czasu manipulowania określa się w zależności od następujących cech i parametrów przebiegającego procesu montażu [2]:

- Komponent (zespół lub część) jest ciałem stałym lub niestałym elementem procesu montażu. Zespół jest uznawany za część, jeśli jest montowany jako całość.
- „Przytrzymanie wymagane” oznacza, że montowana część jest niestabilna po umieszczeniu, włożeniu lub podczas kolejnych operacji i będzie wymagać ponownego chwytania i wyrównania lub przytrzymania.
- Część jest łatwa w montażu i w ustaleniu pozycji, jeżeli jej postać konstrukcyjna ma cechy ułatwiające montaż, np. przez zaprojektowanie faz na ostrych krawędziach.
- Opór napotkany podczas wstawiania części.
- Standardowy czas dokręcania zawiera dodatkowy czas, aby podnieść elektronarzędzia, opuścić śrubę lub nakrętkę i uruchomić narzędzie.

Przy określaniu wskaźnika czasowego manipulacji trzeba ocenić, czy manipulacja może być wykonana: jedną ręką, jedną ręką z pomocniczym uchwytem, dwoma rękami, dwoma rękami ze wspomaganie mechanicznym.

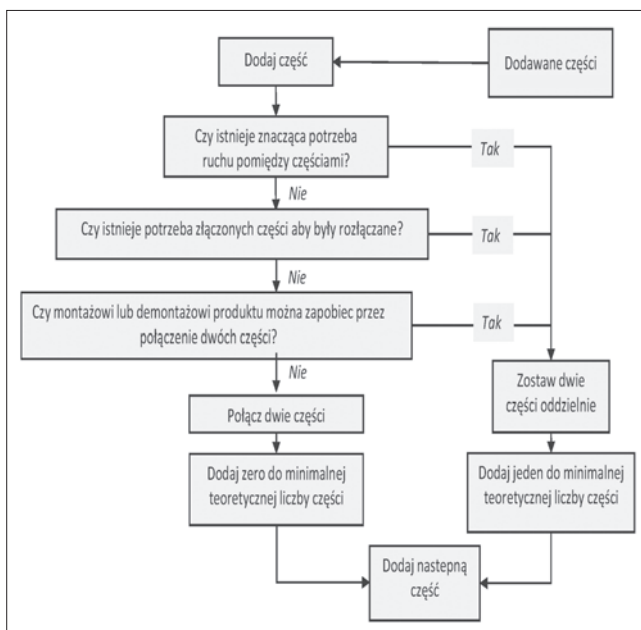
Wskaźnik czasowy osadzania części jest rozpatrywany dla trzech sytuacji:

- część jest zamontowana lecz nie połączona,
- część jest zamontowana i połączona,
- część jest zmontowana po wykonaniu dodatkowej operacji.

Dla każdej z tych sytuacji określany jest wskaźnik osadzenia na podstawie tabel wskaźników. Kolejnym etapem analizy jest sprawdzenie możliwości wyeliminowania części. Schemat toku postępowania dotyczącego eliminacji części pokazano na rys. 3 (ocena możliwości występowania kilku części w postaci jednej całości).

Przedstawiony dalej tok postępowania został opracowany z myślą o produkcji wielkoseryjnej. Końcowym etapem jest obliczenie: sumy liczby operacji, całkowitego czasu operacji, całkowitego kosztu operacji, teoretycznej minimalnej liczby części oraz wskaźnika technologiczności produkcji DFMA:

$$S_{io} = \sum O_i \quad (1)$$



Rys. 3. Schemat eliminacji komponentów B&D DFA [2]

gdzie: S_{io} – suma liczby operacji montażowych [2]; O_i – i -ta operacja montażowa.

$$T_{op} = \sum T_{mau} + \sum T_{mov} \quad (2)$$

gdzie: T_{op} – całkowity czas operacji montażowych [2]; T_{mau} – czas czynności montażowej o u -tym wskaźniku czasu manipulacji; T_{mov} – czas czynności montażowej o v -tym wskaźniku czasu osadzania.

$$DFMA_{wp} = \frac{(3 \cdot S_{io})}{T_{op}} \quad (3)$$

gdzie: $DFMA_{wp}$ – wskaźnik technologiczności konstrukcji przed oceną [2].

$$DFMA_{wpo} = \frac{(3 \cdot S_{ipo})}{T_{opo}} \quad (4)$$

gdzie: $DFMA_{wpo}$ – wskaźnik technologiczności konstrukcji po analizie [2]; S_{ipo} – suma liczby operacji montażowych po analizie; T_{opo} – teoretyczny minimalny czas operacji montażowych po analizie.

Podjęto próbę modyfikacji tej metody i jej zastosowania również w przypadku produkcji seryjnej i małoseryjnej. Metoda B&D, ze względu na prostą konstrukcję w porównaniu z innymi metodami (np. Lucas DFA [6, 7]), może być zdaniem autorów podatna na taką modyfikację. W organizacji produkcji ważna jest unifikacja i normalizacja komponentów składowych wyrobu, co można określić wskaźnikiem unifikacji komponentów:

$$DFMA_{wUNK} = \frac{(3 \cdot S_{UNK})}{T_{op}} \cdot 100\% \quad (5)$$

gdzie: $DFMA_{wUNK}$ – wskaźnik technologiczności konstrukcji po analizie dla zunifikowanych i znormalizowanych komponentów; S_{UNK} – suma zunifikowanych i znormalizowanych komponentów montażowych po analizie.

Z punktu widzenia kosztów obróbki, zastosowania grupowych planów obróbki oraz operacji niewymagających przebrojenia stanowisk pracy, poprawę efektywności procesu ze względu na zwiększenie seryjności produkcji można określić wskaźnikiem unifikacji wykonywanych operacji:

$$DFMA_{wOG} = \frac{(3 \cdot S_{OG})}{T_{op}} \cdot 100\% \quad (6)$$

gdzie: $DFMA_{wOG}$ – wskaźnik technologiczności konstrukcji po analizie konstrukcji komponentów umożliwiających realizację grupowej obróbki; S_{OG} – suma komponentów po analizie, możliwych do realizacji z zastosowaniem technologii obróbki grupowej.

Przykład

Według metody B&D DFA poddano analizie projekt prototypu przekładni jednostopniowej (rys. 4).

W pierwszej kolejności zdefiniowano przebieg procesu montażu, którego przykładowy fragment przedstawiono w tablicy. Dla każdej montowanej części oraz dla każdego definiowanego kroku procesu montażu określono wartości S_{io} , T_{op} , $DFMA_{wp}$, $DFMA_{wpo}$:

$$\text{wskaźnik } S_{io}: S_{io} = \sum O_i = 113 \quad (7)$$

$$\text{wskaźnik } T_{op}: T_{op} = \sum T_{mau} + \sum T_{mov} = 683,19 \quad (8)$$

wskaźnik $DFMA_{wp}$:

$$DFMA_{wp} = \frac{(3 \cdot S_{io})}{T_{op}} = 3 \times 113/683,19 = 0,496 (\sim 50\%) \quad (9)$$

Aby poprawić technologiczność montażu przekładni, powinno się rozważyć przeprowadzenie analiz w zakresie:

- zastosowania nowej postaci konstrukcyjnej (odlew),
- zastosowania nowej struktury montażu – na drodze montowania zespołów, np. wału z nasadzoną kołem zębatym, łożyskami, zastosowania oprzyrządowania narzędziowego, widoczności i łatwości manipulacji wartością fizycznych obciążeń przy montażu itd. [2].

Po zmianie konstrukcji przekładni i przeprowadzeniu ponownej analizy technologiczności konstrukcji otrzymano następujące wartości wskaźników:

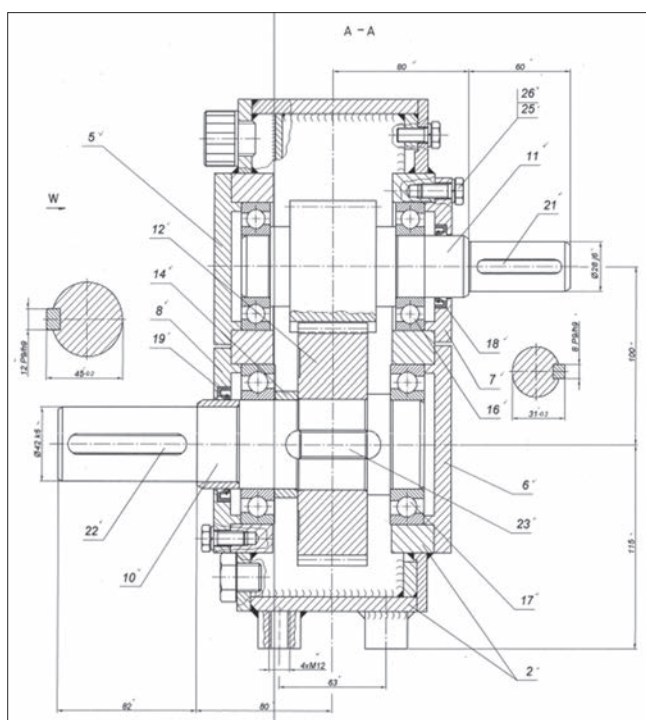
- po zmianie $S_{wpo} = 22$,
- po unifikacji $S_{wpo} = 37$ w tym 27 zuniifikowanych elementów,

TABLICA. Wyniki analizy technologiczności montażu przekładni z rys. 4.

DFMA Zapis analizy																
Dane produktu			Szczegóły montażu komponentów				Manipulowanie		Osadzenie		Teoretyczna minimalna liczba Części/Operacji					
Nr	Opis	Wstępne założenie procesu	Ilość powtórzeń czynności	Grubość (t mm)	Rozmiar (t mm)	Rotacja Alpha (Stopnie)	Rotacja Beta (Stopnie)	Kod	Index czasu [min]	Kod	Index czasu [min]	Index czasu operacji	Relatywny ruch [min]	Inny materiał	Oddzielność części	Czy potrzebne
1	Korpus	pobranie	1	120	309	360	360	30	1,95	0	1,5	3,45	Y	Y	Y	1
2	łożysko 16	prasowanie do korpusu	1	17	72	180	0	0	1,13	31	5	6,13	Y	Y	Y	1
3	łożysko 17	prasowanie do korpusu	1	20	90	180	0	0	1,13	31	5	6,13	Y	Y	Y	1
4	Wałek zębaty	prasowanie do łożyska 16	1	37	194	360	0	88	6,35	41	7,5	13,85	Y	Y	Y	1
5	Wałek wal' obrótowy	pobranie	1	28	216	360	360	30	1,95	0	1,95	Y	Y	Y	1	
8	Tuleja dystansowa 14	montaż na zespół wałka	1	4	60	180	0	0	1,13	1	2,5	3,63	Y	Y	Y	0
9	Podgrzewanie	podgrzewanie koła zębatego do 180	1						0	99	1,2	1,2	Y	Y	Y	0
10	Zespół wałka pocm: towany	prasowanie do łożyska 17	1	135	216	360	360	30	1,95	31	9	10,93	Y	Y	Y	1
11	Pokrywka	pobranie	1	25	288	360	360	30	1,95	0	1,95	Y	Y	Y	1	
12	łożysko 16	prasowanie do pokrywki	3	17	72	180	0	0	1,13	31	5	6,13	Y	Y	Y	1
13	łożysko 17	prasowanie do pokrywki	1	20	90	180	0	0	1,13	31	5	6,13	Y	Y	Y	1
18	Podkładka sprężająca 28.2	montaż do śruby	10	4	14	180	0	5	18,4	6	55	73,5	Y	Y	Y	0
19	Śruba z podkładką	przykręcanie i pokrywki do korpusu	10	4	20	360	0	10	15	38	60	75	Y	Y	Y	0
22	Podkładka sprężająca 28.2	montaż do śruby	4	4	14	180	0	5	7,36	6	22	29,36	Y	Y	Y	0
23	Uszczelniaacz Monolith	uszczelnianie	1						0	99	1,2	1,2	Y	Y	Y	1
24	Śruba z podkładką	przykręcanie pokrywki do korpusu	4	4	14	180	0	10	6	38	34	30	Y	Y	Y	0
Suma liczby Części/Operacji - przed zmianą - 1.13			113						Suma czasów operacji - przed zmianą - 683,19		683,19	Teoretyczna minimalna liczba Części/Operacji				22

po zmianie - 22; po unifikacji - 27; liczba komponentów podlegających obróbce grupowej 19

po zmianie - 244,59; po unifikacji - 372; po analizie możliwości obróbki grupowej - 421



Rys. 4. Schemat analizowanej przekładni

- po określeniu grupowej obróbki $S_{wpo} = 42$ w tym liczba komponentów podlegających obróbce grupowej: 19,

$$\text{wskaźnik } DFMA_{wpo} = \frac{(3 \cdot S_{1po})}{T_{1po}} = \frac{3 \cdot 22/244,59}{1} = 0,26 \sim 26\%$$

Na podstawie podanych wartości wskaźnika określono pozostałe współczynniki dla zmienionej konstrukcji zaprojektowanej przekładni:

$$\text{wskaźnik } S_{UNK}: S_{UNK} = \sum O_i = 27 \quad (10)$$

$$\text{wskaźnik: } T_{UNK} = \sum T_{mau} + \sum T_{mov} = 372 \quad (11)$$

$$100\% = 327/372 = 0,217 (\sim 22\%) \quad (12)$$

$$\text{wskaźnik: } S_{OG}: S_{OG} = \sum O_i = 19 \quad (13)$$

$$\text{wskaźnik: } T_{OG} = \sum T_{mau} + \sum T_{mov} = 421 \quad (14)$$

$$DFMA_{wog} = \frac{(3 \cdot S_{OG})}{T_{OG}} \cdot 100\% = \frac{3 \cdot 19/421}{1} = 0,135 (\sim 14\%) \quad (15)$$

Podsumowanie

Metoda B&D przez analizę uzyskanych wartości parametrów oceny technologiczności montażu:

- umożliwia skrócenie czasów, eliminację błędów, obniżenie kosztów procesu, uwzględnienie oprócz montażu wielu innych czynników, np. dostępności części zamiennych, seryjności wytwarzania, warunków produkcyjnych w postaci rodzajów wyposażenia, dostępnych technik montażu, poziomu automatyzacji czy zakresu zewnętrznych zleceń kooperacyjnych. Metoda może znaleźć zastosowanie przy mniejszych seriach produkcyjnych;
- ocena technologiczności konstrukcji wzbudza kreatywność projektantów; ocenę technologiczności w postaci podanych wskaźników i współczynników powinni przeprowadzić eksperci z dużym doświadczeniem produkcyjnym.

LITERATURA

- [1] Abdullah A., Popplewell K., Page C.J. "A review of the support to tools for the process of assembly method selection and assembly planning". *International Journal of Production Research*. 41, 11 (2003): 2391-2410.
- [2] Boothroyd G., Dewhurst P. "Design for Assembly. A Designers Handbook", Cleveland, Ohio, USA: Penton, 1983.
- [3] Dochibhatla S.V.S., Bhattacharya M., Morkos B. "Evaluating Assembly Design Efficiency: A Comparison Between Lucas and Boothroyd-Dewhurst Methods". *ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. V004T05A012-V004T05A012 (2017 August).
- [4] James A.T., Gandhi O.P., Deshmukh S.G. "Development of methodology for the disassemblability index of automobile systems using a structural approach". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D: Journal of Automobile Engineering*. 231, 4 (2017): 516-535.
- [5] Knight W.A., Boothroyd G. "Fundamentals of metal machining and machine tools". 198 (2005). CRC Press.
- [6] Matuszek J., Seneta T. "Algorytmizacja procesu wdrażania nowego produktu w warunkach wielkoseryjnej produkcji". *Mechanik*. 7 (2016): 755-757.
- [7] Matuszek J., Seneta T. "Ocena technologiczności konstrukcji w procesach montażu wyrobów metodą Lucas DFA". *Mechanik*. 7 (2017): 523-525. DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.7.66>.
- [8] Pan L., Cho H.J., Park J.I. "Study on the design factors affecting the operating actions that can be used easily at the design stage". *Advanced Materials Research. Trans Tech Publications*. 1061 (2015): 712-715.
- [9] Shetty D., Ali A. "A new design tool for DFA/DFD based on rating factors". *Assembly Automation*. 35, 4, (2015): 348-357.
- [10] Shukor A.I.A., Adam A. "Evaluation of design efficiency using Boothroyd & Dewhurst Method for PCB drilling machine products". *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*. 19, 5, (2018).