

Ocena technologiczności konstrukcji w procesach montażu według zmodyfikowanej metody Lucas DFA

Evaluation of design manufacturability in assembly processes by modified Lucas Design for Assembly method

JÓZEF MATUSZEK
TOMASZ SENETA
ALEKSANDER MOCZAŁA*

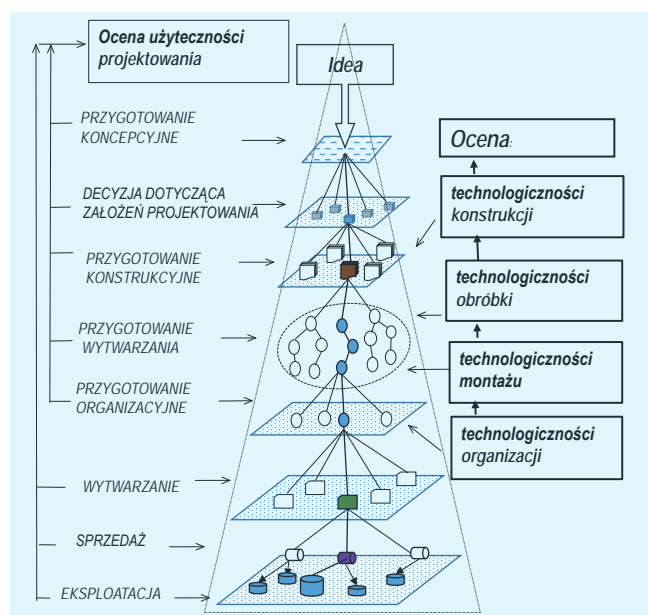
DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.7.75>

W pracy przedstawiono metodologię projektowania produkcji wyrobów z uwzględnieniem kryterium oceny technologiczności konstrukcji. Omówiono sposób oceny procesu z punktu widzenia obróbki, montażu i organizacji produkcji na przykładzie zmodyfikowanej metody oceny technologiczności konstrukcji DFA (*design for assembly*).

SŁOWA KLUCZOWE: projektowanie procesu produkcji, technologiczność konstrukcji

The paper presents a methodology for the design of the production product from the point of view of manufacturability design criterion. The evaluation method from the point of view of machining, assembly and organization of production was discussed on the example of a modified method of assessing the technological character of the structure from the point of view of the assembly operation (Design for Assembly – DFA). KEYWORDS: production process design, construction manufacturability

Rozwój technologii obróbki (dzięki automatyzacji i rozszerzeniu możliwości wykonywania przedmiotów o złożonej konstrukcji) w połączeniu ze znacznym udziałem prac ręcznych w procesach montażu wyrobów gotowych wywołał zmianę podejścia do wdrażania do produkcji nowych wyrobów [5]. Proces projektowania nowego wyrobu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przebieg projektowania procesu produkcji nowego wyrobu

* Prof. dr hab. inż. Józef Matuszek (jmatuszek@ath.bielsko.pl), mgr inż. Tomasz Seneta (tomasz.seneta@zf.com), dr inż. Aleksander Moczala (amoczala@ath.bielsko.pl) – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, Katedra Inżynierii Produkcji

Proces projektowania powinien być określany z punktu widzenia różnych kryteriów użyteczności. Ocenie podlegają: przygotowanie marketingowo-koncepcyjne; dokumentacja – konstrukcyjna, wytwarzania i organizacyjna; realizacja procesu produkcyjnego; dystrybucja; warunki eksploatacji i likwidacji wyrobu.

Błędy zaprojektowanego procesu generują duże koszty związane z eliminowaniem usterek na etapie realizacji produkcji. W publikacjach dotyczących produkcji wielkoseryjnej (np. w przemyśle motoryzacyjnym) wiele uwagi poświęca się zatem zagadnieniom technologiczności konstrukcji z punktu widzenia montażu.

Metody kształtowania procesów montażu, określane skrótami DFA (*design for assembly*) lub PdM (projektowanie dla montażu), przedstawiono w pracach [2–6, 8]. Najbardziej rozpowszechnioną metodą DFA jest metoda Lucas DFA [6].

Zmodyfikowana metoda Lucas DFA

Tradycyjna ocena technologiczności metodą Lucas DFA bazuje na określeniu trzech wskaźników, których wartości są związane ze względną miarą trudności montowania. W wyniku oceny dąży się do zmniejszenia liczby montowanych elementów finalnego wyrobu (analiza funkcjonalna) oraz przeprowadza się analizę operacji montażu pod kątem trudności, złożoności i czasu montażu (analiza manewrowania i sposobu montowania).

Wskaźnik efektywności projektu na podstawie analizy funkcjonalnej określa się wzorem:

$$W_{ep} = \frac{L_{kA}}{(L_{kA} + L_{kB})} \times 100\% \quad (1)$$

gdzie: W_{ep} – wskaźnik efektywności projektu; L_{kA} – liczba komponentów A (spełniających funkcje produktu); L_{kB} – liczba komponentów B (cechujących się brakiem spełnienia funkcji produktu, np. nitów, podkładek).

Ocenę manewrowania montowanych komponentów wyrobu określa współczynnik manewrowania W_{man} :

$$W_{man} = I_{man}/L_{kA} \quad (2)$$

$$I_{man} = L_{pA} + L_{pB} + L_{pC} + L_{pD}$$

gdzie: I_{man} – indeks manewrowania; L_{pA} , L_{pB} , L_{pC} , L_{pD} – sumy punktów z segmentów A, B, C, D według [6].

Ocenę przebiegu operacji montażowych z punktu widzenia wykonalności określa wzór opisujący wyniki analizy współczynnika montowalności W_{mon} :

$$W_{mon} = \frac{W_m + W_d}{L_{kA}} \quad (3)$$

gdzie: W_m – wskaźnik czynności głównych ($W_m = L_{mA} + L_{mB} + L_{mC} + L_{mD} + L_{mE} + L_{mF}$, gdzie L_{mA}, \dots, L_{mF} – sumy segmentów A, ..., F według [6]); W_d – wskaźnik czynności dodatkowych.

Przeprowadzona analiza umożliwia dokonanie zmian konstrukcyjnych wyrobu, poprawiających efektywność procesów montażu [6]. Przedstawiony tok postępowania został opracowany z myślą o produkcji wielkoseryjnej. W opracowaniu podjęto próbę modyfikacji tej metody, aby można ją było zastosować również w przypadku produkcji seryjnej i małoseryjnej. Metoda Lucas DFA – ze względu na swą prostotę w porównaniu z innymi metodami – może być podatna na taką modyfikację.

Zgodnie z rys. 1 technologiczność konstrukcji można rozważać pod kątem obróbki oraz organizacji procesów obróbki i montażu. Z punktu widzenia organizacji produkcji ważne są unifikacja i normalizacja komponentów wyrobu, określane wskaźnikiem unifikacji W_{unk} :

$$W_{\text{unk}} = \frac{L_{\text{kU}}}{(L_{\text{kU}} + L_{\text{kNU}})} \times 100\% \quad (4)$$

gdzie: L_{kU} – liczba komponentów zunifikowanych i znormalizowanych; L_{kNU} – liczba komponentów niezunifikowanych i nieznormalizowanych.

Zastosowanie grupowych planów obróbki, operacji grupowych oraz operacji niewymagających przezbrojenia stanowisk pracy wiąże się z obniżeniem kosztów przygotowania procesów wytwarzania. Poprawę efektywności procesu można określić wskaźnikiem unifikacji wykonywanych operacji W_{uno} :

$$W_{\text{uno}} = \frac{L_{\text{OG}}}{(L_{\text{OG}} + L_{\text{ONG}})} \times 100\% \quad (5)$$

gdzie: L_{OG} – liczba realizowanych operacji niewymagających przezbrojenia stanowisk pracy; L_{ONG} – liczba operacji wymagających przezbrojenia stanowisk pracy.

Przykład

Analizie metodą Lucas DFA poddano projekt prototypu przekładni jednostopniowej [6]. Założono, że korpus będzie produkowany w wersji spawanej. Zdefiniowano przebieg procesu montażu przekładni. Dla każdej montowanej części oraz dla każdego definiowanego kroku procesu montażu obliczono poszczególne wskaźniki według metody niezmodyfikowanej. Wyniki analizy dla procesu montażu przedstawiono w [6].

$$L_{\text{kA}} = 24, L_{\text{kB}} = 81, L_{\text{kA}} + L_{\text{kB}} = 105$$

$$W_{\text{ep}} = 24/105 = 0,23 \text{ (23\%)}$$

$$I_{\text{man}} = L_{\text{pA}} + L_{\text{pB}} + L_{\text{pC}} + L_{\text{pD}} = 48 + 10,9 + 2,7 + 5,6 = 67,2$$

$$L_{\text{kA}} = 24$$

$$W_{\text{man}} = 67,2/24 = 2,80$$

$$L_{\text{kA}} = 24$$

$$W_{\text{m}} = L_{\text{mA}} + L_{\text{mB}} + L_{\text{mC}} + L_{\text{mD}} + L_{\text{mE}} + L_{\text{mF}} = 108,2 + 2,1 + 10,5 + 18 + 11,9 + 7 + 126,5 = 284,2$$

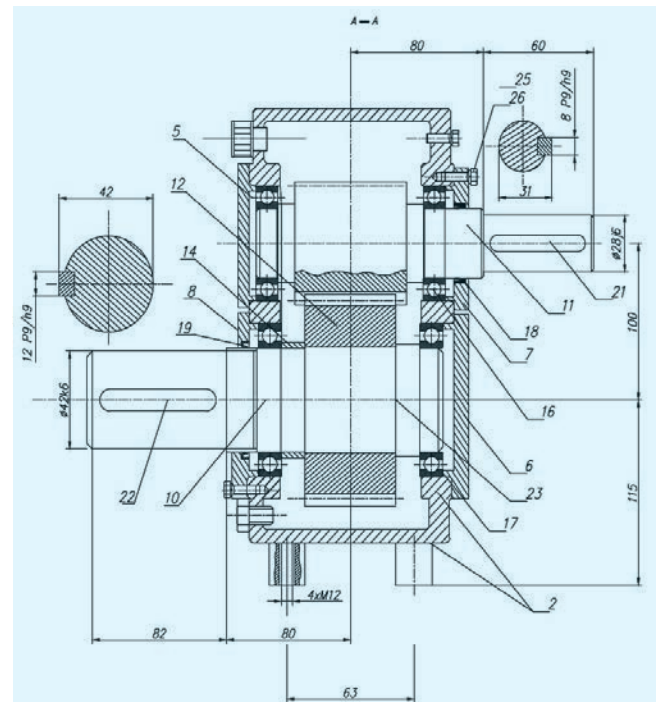
$$L_{\text{kA}} = 24$$

$$W_{\text{m}} = 284,2$$

$$W_{\text{mon}} = 284,2/24 = 11,84$$

Z obliczeń w podanym przykładzie wynika, że konstrukcja jest nietechnologiczna. W zastosowanej metodzie oceny $W_{\text{ep}} = 23\%$ (autorzy publikacji [9] jako minimum podają wartość 60%), $W_{\text{man}} = 2,80$, a $W_{\text{mon}} = 11,84$ (według [9] oba wskaźniki powinny być mniejsze od 2,5).

Na podstawie otrzymanych wartości wskaźników i współczynników zmieniono konstrukcję zaprojektowanej przekładni (rys. 2). Przekładnia należy do typoszeregu, składającego się z kilku przekładni o różnej wielkości, w których zastosowano te same rozwiązania postaci konstrukcyjnej.



Rys. 2. Schemat analizowanej przekładni: 2 – korpus; 5, 6, 7, 8 – pokrywki łożyskowe; 10 – wałek; 11 – zębnik; 12 – koło zębate; 14 – pierścienie dystansowe; 17, 16 – łożyska; 18, 19 – uszczelnienia; 21, 22, 23 – wpusty; 25, 26 – podkładki, śruby

Wyniki analizy technologiczności nowej wersji konstrukcyjnej przekładni przedstawiono w formie tabelarycznej (rys. 3). Zestawiono operacje, którym przypisano parametry wynikające z analizy funkcjonalności (w postaci komponentów zaliczanych do grupy A lub B [6]), manewrowania (w ramach segmentów A, B, C i D [6]) oraz montowalności (według wskaźników czynności głównych A, B, C, D, E i F oraz operacji dodatkowych według toku postępowania podanego w [6]). Ponownie określono wskaźniki: efektywności projektu W_{ep} , manewrowania W_{man} oraz montowalności W_{mon} .

Na podstawie danych zestawionych w tabeli (rys. 3) $L_{\text{kA}} = 18$, a $L_{\text{kB}} = 9$. Po podstawieniu do wzoru (1) otrzymuje się:

$$W_{\text{ep}} = \frac{18}{18+9} \times 100\% = 67\% \quad (6)$$

Ponadto $L_{\text{pA}} = 27$, $L_{\text{pB}} = 4,3$, $L_{\text{pC}} = 1,4$ oraz $L_{\text{pD}} = 3$, więc: $I_{\text{man}} = L_{\text{pA}} + L_{\text{pB}} + L_{\text{pC}} + L_{\text{pD}} = 7 + 4,3 + 1,4 + 3 = 35,2$. Po podstawieniu tych wartości do wzoru (2):

$$W_{\text{man}} = \frac{35,2}{18} = 1,96 \quad (7)$$

Sumując wartości $L_{\text{mA}} = 54$, $L_{\text{mB}} = 1,4$, $L_{\text{mC}} = 0$, $L_{\text{mD}} = 7,5$, $L_{\text{mE}} = 9,1$, $L_{\text{mF}} = 6,3$ oraz $Sec = 35$, obliczono współczynnik czynności głównych $W_{\text{m}} = 112,8$.

Na podstawie wzoru (3) obliczono współczynnik montowalności:

$$W_{\text{mon}} = \frac{112,8}{18} = 6,27 \quad (8)$$

Krok montażu	Opis	Analiza funkcjonalna	Analiza pobierania					Opis pomocniczy	Analiza montowalności										
			A	B	C	D	Suma		A	B	C	D	E	F	Sec	Suma	Suma narastająco		
1	Pobranie	Korpus	A	1	3	0	0	0	3	Pobranie i posadowienie	1	0	0	0	0	0	0	1	1
2	Prasowanie na walek zębaty	Łożysko 16	A	1	1	0	0	0	1,4	Prasowanie	1	0	0	0	0	0,7	0	1,7	2,7
3										Pomiar pozycji łożyska								0	2,7
4	Prasowanie na walek zębaty	Łożysko 17	A	1	1	0	0	0	1,4	Prasowanie	1	0	0	0	0	0,7	0	1,7	4,4
5										Pomiar pozycji łożyska								0	4,4
6	Prasowanie do korpusu	Walek zębaty	A	1	1	0	0	0	1,3	Pobranie i przytrzymanie	1	0	0	0	0	0	0	1	5,4
7										Prasowanie do łożyska								0	5,4
8	Pobranie	Walek wolnoobrotowy	A	1	1	0	0	0	1,3	Pobranie i posadowienie	1	0	0	0	0	0	0	1	6,4
9	Montaż	Wpust 23	B	1	1	0	0	0	1,2	Montaż na zespół wałka	1	0	0	0	0,7	0	0	1,7	8,1
10	Montaż na zespół wałka	Koło zębate 5	B	1	1	0	0	0	1,7	Montaż na zespół wałka	2	0,1	0	0	0,7	0,7	0	3,5	11,6
11	Montaż na zespół wałka	Tuleja dystansowa 14	B	1	1	0	0	0	1	Montaż na zespół wałka	1	0,1	0	0	0	0	0	1,1	12,7
55	Montaż na zespół wałka	Wpust pryzmatyczny 22	B	1	1	0	0	0	1,2	Montaż na zespół wałka	1	0	0	0	0,7	0	0	1,7	71,9
56	Montaż do korpusu	Odpowietrznik 27	A	1	1	0	0	0	1,3	Pobranie i posadowienie	1	0	0	0	0	0	0	1	72,9
57										Przykręcanie	4	0,1	0	0	0	0	0	4,1	77
58	Montaż do korpusu	Olejowskaz 28	A	1	1	0	0	0	1,3	Pobranie i posadowienie	1	0	0	0	0	0	0	1	78
59										Przykręcanie	4	0,1	0	0	0	0	0	4,1	82,1
60	Montaż do korpusu	Korek 29	A	1	1	0	0	0	1,3	Pobranie i posadowienie	1	0	0	0	0	0	0	1	83,1
61	Montaż do korpusu	Pierścień uszczelniający 30	A	1	1	0	0	0	1,3	Założenie na korek	1	0,1	0	0	0	0	0	1,1	84,2
62										Korek z pierścieniem - przykręcanie	4	0,1	0	0	0	0	0	4,1	88,3
63	Pobranie i ustawienie	Tabliczka znamionowa	B	1	1	0	0	0	1,5	Pobranie i posadowienie	2	0,1	0	0	0,7	0	0	2,8	91,1
64	Nitowanie	Nitokotek	B	1	2	0	0	0	1,7	Pobranie i posadowienie	2	0,1	0	0	0	0	0	2,1	93,2
65										Nitowanie	4	0,1	0	0	0,7	0	0	4,8	98
66										Dodatkowe nity	2	0,1	0	0	0,7	0	12	14,8	112,8
82																		112,8	
83					27	4	1	3	35,2									112,8	
84				18	9						109,6	2	10,5	15	11,9	7	124	112,8	
				67%				1,96										112,8	
		Wskaźnik efektywności projektu						Wskaźnik pobierania										Wskaźnik montowalności	6,27
									Montowanie										

Rys. 3. Wyniki analizy technologiczności montażu przekładni (rys. 2) po dokonanej ocenie technologiczności

Zgodnie z przedstawionymi obliczeniami można stwierdzić, że wyniki analizy dla przekładni o korpusie żeliwnym odlewanym są lepsze w porównaniu z wynikami dla przekładni o korpusie spawanym. Wskaźnik efektywności projektu W_{ep} powinien mieć jak największą wartość – po zmianie wyniósł on 67%. Współczynniki manewrowania oraz montowalności W_{man} i W_{mon} powinny być jak najmniejsze – po zmianie wynoszą odpowiednio 1,96 i 6,27.

Wskaźnik unifikacji komponentów dla przekładni z rys. 2 (tylko korpus i pokrywa nie są zunifikowane – nie wchodzi w skład innych wyrobów) wynosi:

$$W_{unk} = \frac{25}{(25+2)} \times 100\% = 93\% \quad (9)$$

Wskaźnik unifikacji obróbki wynosi:

$$W_{uno} = \frac{58}{(58+67)} \times 100\% = 46\% \quad (10)$$

Podsumowanie

Analizując wartości parametrów oceny technologiczności montażu przekładni, można stwierdzić że:

- ocena wartości parametrów (rys. 3) może być podstawą do analizy technologiczności konstrukcji wyrobu;
- ocena powinna uwzględniać wiele innych czynników związanych ze sprzedażą, z serwisowaniem, dostępnością części zamiennych, seryjnością wytwarzania, dostępnymi technikami montażu, poziomem automatyzacji, usługami kooperacyjnymi, możliwością zastosowania komponentów handlowych, kulturą techniczną załogi itp.;
- metoda może być z powodzeniem stosowana również przy mniejszych seriach produkowanych wyrobów – w przypadku produkcji grupy wyrobów technologicznie podobnych, np. przekładni zębatach ogólnego przeznaczenia;

- pomocna przy ocenie konstrukcji jest standaryzacja operacji obróbkowych i montażowych – ułatwia oszacowanie czasów wykonywania tych operacji;
- przedstawiony sposób postępowania może być przydatny dla: projektantów, osób wdrażających do produkcji nowe wyroby oraz inżynierów produkcji, prowadzących prace racjonalizatorskie na etapie udoskonalania i poszerzania asortymentu produkcji.

LITERATURA

- 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): s. 2391–2410, 2396.
- Egan M. "Design for Assembly in the Product Development Process – A Design Theory Perspective". Thesis for the degree of Licencjat of Engineering. Chalmers. Report No. 1997-11-14, 1997.
- Favi C., Germani M., Mandolini M. "Design for manufacturing and assembly vs. design to cost: toward a multi-objective approach for decision-making strategies during conceptual design of complex products". *Procedia CIRP*. 50 (2016): s. 275–280.
- Kuo B.T.C., Huang S.H. Zhang H.C. "Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives". *Computers & Industrial Engineering*. 41, 3 (2001): s. 241–260.
- Matuszek J., Seneta T. "Algorytmizacja procesu wdrażania nowego produktu w warunkach wielkoseryjnej produkcji". *Mechanik*. 7 (2016): s. 755–757.
- Matuszek J., Seneta T. "Evaluation of design manufacturability in new product production launches by Lucas DFA method". *Mechanik*. 7 (2017): s. 523–525.
- Pasichnyk V., Lashyna Y. „Montażowo zorientowane projektowanie z zastosowaniem DFA Expert”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej: Mechanika*. 279 (2011): s. 9–16.
- Praca zbiorowa. Advanced Product Quality Planning (APQP) and Control Plan. Reference Manual. AAIQ – Chrysler Corporation, Ford Corporation, General Motors Corporation. Adare Carvin., Unit 1, Trade Link, Western Ave, West Thurrock, Grays, Essex England (norma branżowa).
- Swift K., Brown N. "Design for Assembly/Manufacturing Analysis Practitioners Manual (version 10.5)". University of Hull, 1994.
- Więcek D. „Określanie kosztów produkcji według rachunku kosztów działań”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej: Organizacja i Zarządzanie*. 42 (2007): s. 117–124.