

SZACOWANIE KOSZTÓW PROCESU MONTAŻU NA PRZYKŁADZIE WYBRANEGO TYPOSZEREGU WYROBÓW

Piotr CHWASTYK, Dominika BINIASZ, Mariusz KOŁOSOWSKI

Streszczenie: W pracy przedstawiono metodę oszacowania kosztów procesu montażu na przykładzie wybranej grupy wyrobów. Proces montażu jest trudny dla przeanalizowania ze względu na duży udział pracochłonności. Z tego względu wykorzystano zależność pomiędzy cechami wyrobu a kosztami procesu montażowego. Opracowano aplikację umożliwiającą, na podstawie danych z systemu CAD, w oparciu o opracowaną funkcję kosztów, oszacowanie kosztów montażu.

Słowa kluczowe: proces montażu, CAD, metoda najmniejszych kwadratów

1. Wprowadzenie

Oszacowanie kosztów przeprowadzenia procesów montażowych w większości przypadków jest dość trudną operacją. Specyfika stanowisk roboczych, niewielki stopień wykorzystania maszyn i urządzeń oraz duży udział prac ręcznych utrudniają opracowanie metod pozwalających na dokładne oszacowanie czasu i kosztów montażu. Dodatkową trudność sprawiają procesy montażowe, podczas których dodatkowo przeprowadza się operacje obróbki.

Na procesy montażowe w znacznym stopniu wpływają konstrukcyjne właściwości montowanych wyrobów, a przede wszystkim konstrukcyjne ukształtowanie części. Stąd wynikają uwarunkowania montażowe, które są określone przez funkcje przypisane wyrobowi i zależą od założonej zasady pracy. Strukturalna budowa wyrobu znajduje bezpośrednie odbicie w strukturalnym podziale procesu montażowego. [3] Tę zależność można wykorzystać przy szacowaniu kosztów montażu, szczególnie, gdy mamy do czynienia z wyrobami produkowanymi w typoszeregach.

2. Model określania kosztów montażu

W procesie montażu, głównym czynnikiem kosztowym jest pracochłonność. Koszty związane z wykorzystaniem dodatkowych urządzeń i niezbędnych środków produkcji stanowią niewielką część tych kosztów. Analizując procesy montażu można zauważyć, że koszty ich montażu uzależnione są od pewnych cech wyrobów. Wyodrębniono te cechy, które mają bezpośredni wpływ na koszt montażu. Po gruntownej analizie wyrobów odrzucono te cechy, które były wspólne dla całej rodziny wyrobów a ich wpływ na różnice w procesie montażu był niewielki. Ustalono, że największy wpływ na przebieg procesu montażowego, a tym samym na jego koszty mają główne wymiary wyrobu, a co za tym idzie ich ciężar. Można zatem stwierdzić, że istnieje zależność pomiędzy kosztami montażu a masą, którą można przedstawić w postaci funkcji:

$$K = f(m) \quad (1)$$

gdzie:

K – koszt montażu,
M – masa całkowita wyrobu

W celu oszacowania kosztów montażu zastosowana została metoda parametryczna, która uzależnia koszt od parametrów mających decydujący wpływ. Metoda ta uwzględnia zbiór historycznych kosztów oraz dokonuje analizy z użyciem różnych technik matematycznych. Metody parametryczne pozwalają na przenoszenie technicznych wartości (wielkość, masa, materiał itp.) charakteryzujących produkt i znanych projektantowi, na koszty, bez opisywania produktu całkowicie. Do opracowania modelu wykorzystana została metoda najmniejszych kwadratów. Weryfikację modelu przeprowadzono w oparciu o poziom istotności, wartości błędów względnych, współczynnik determinacji, test symetrii, test liczby serii, stacjonarność i autokorelację testem Durбина-Watsona. Do wyznaczenia modelu posłużyły dane dotyczące kosztów montażu wyrobów pochodzące z ostatniej serii produkcyjnej wszystkich odmian wymiarowych.

Funkcja kosztów montażu została opisana równaniem prostej, która na podstawie dotychczas przeprowadzanych badań empirycznych stanowi najczęstszy przypadek zależności kosztów.

$$K = am + b \quad (2)$$

gdzie:

K – koszt montażu,
m – masa wyrobu,
a,b – stałe

Dla ustalenia wartości stałych a i b zastosowano zasadę najmniejszych kwadratów, która polega na znalezieniu takich wartości ocen parametrów strukturalnych modelu, by suma kwadratów odchyleń empirycznych wartości zmiennej objaśnianej od jej wartości teoretycznych wyznaczonych z modelu była jak najmniejsza. Warunek ten można opisać następująco:

$$\sum_{t=1}^n e_t^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

gdzie:

$e_t = K_t - b - am_t$ - odchylenia rzeczywistych wartości od jej wartości teoretycznych, czyli tzw. reszty modelu

Po wyznaczeniu pochodnych cząstkowych względem a i b i przyrównaniu ich do zera otrzymuje się układ równań normalnych. W wyniku rozwiązania układu równań normalnych otrzymuje się następujące wzory:

$$a = \frac{\sum_{t=1}^n (K_t - \bar{K})(m_t - \bar{m})}{\sum_{t=1}^n (m_t - \bar{m})^2} \quad (4)$$
$$b = \bar{K} - a\bar{m}$$

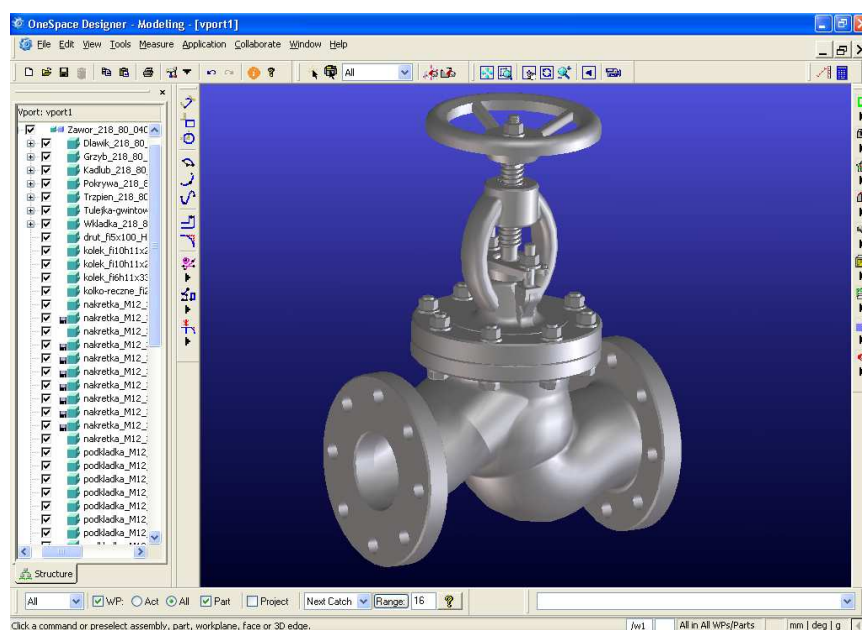
gdzie:

\bar{K}, \bar{m} - średnie arytmetyczne zmiennych K i m

Ustalenie wartości stałych na podstawie powyższych wzorów pozwoliło na otrzymanie poszukiwanej funkcji, a dla stwierdzenia poprawności zbudowanego modelu przeprowadzona została jego weryfikacja.

2. Szacowanie kosztów montażu

Analizę procesu montażu rozpoczyna się od systemu CAD, w którym opracowano model wyrobu. Wykorzystane zostały w tym celu wcześniej opracowane modele wszystkich elementów składających się na wyrób uzupełnione modelami elementów znormalizowanych takimi jak śruby, podkładki, nakrętki, uszczelki itp. [1] Badania przeprowadzono na grupie wyrobów, którymi są zawory zaporowe. Kompletny model zaworu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Model wyrobu wykonany w systemie CAD

Źródło: opracowanie własne

Uzyskana w procesie modelowania struktura wyrobu posiada dwa poziomy. Pierwszy zawiera elementy składające się na wyrób, drugi to szczegółowa struktura obiektów elementarnych wchodzących w skład każdego z tych elementów. [1] Opracowana aplikacja odczytuje strukturę wyrobu opracowaną w systemie CAD (rys. 2.).

Kolejnym etapem jest oszacowanie kosztów własnych zaworu. Na tym etapie program odwołuje się do wcześniej opracowanych procesów wytwórczych elementów, z których składa się nasz wyrób [1]. Odczytuje z bazy danych gotowych procesów wytwórczych informacje o kosztach ich wytworzenia. Ponieważ, jak ustalono wcześniej koszt montażu zależy od wagi wyrobu, ustalono model przedstawiający odpowiednią zależność tych dwóch cech. Istotną informacją jest masa poszczególnych elementów zaworu, która dla każdego z elementów obliczana jest na etapie modelowania.

System CAD dokonuje oszacowania masy elementu na podstawie jego objętości oraz gęstości materiału, z którego jest wykonany. Gęstość materiału stanowi informację zapisaną w bazie danych z materiałami wykorzystywaną w procesie opracowywania modelu CAD. Waga obliczana jest dwukrotnie. Pierwszy raz w momencie wyboru materiału wyjściowego. Drugi raz w momencie zapisu gotowego modelu każdego z elementów, co

Montaż									
Dane Karta wyrobu Koszt własny									
Zawor	218	80	040	0					
Dławik	218	80	040	0	S235JR	110	21	0,3	
Grzyb	218	80	040	0	Gx20Cr14	91,2	48	1,2	
Kadłub	218	80	040	0	GP240GH	310	125	24,0	
Pokrywa	218	80	040	0	GP240GH	195	178	10,0	
Trzpień	218	80	040	0	X20Cr13	315,0	24,0	1,2	
Tulejkagwint	218	80	040	0	EN-GJS-500	36	36	0,2	
Wkładka	218	80	040	0	9SMn28	8	40	0,0	
druć	fi5x100	X17CrNi16-2							
kolek	fi10h11x26	E295							
kolek	fi10h11x26	E295	1						
kolek	fi6h11x33	E295							
kolko	reczne	fi250x17	EN-GJS-500						
nakrętka	M12	C35							

Rys. 2. Odczyt struktury wyrobu z systemu CAD

Źródło: opracowanie własne

uwzględni zastosowane w procesie modelowania obiekty elementarne obrazujące ubytek materiału w procesie obróbki [1]. W ten sposób każdy element otrzymuje dwie dodatkowe informacje, o jego wadze brutto i wadze netto. Koszt własny wyrobu ustalany jest w oparciu o koszt wytworzenia elementów składowych, Zakładowy Arkusz Rozliczeniowy oraz koszty elementów znormalizowanych.

Tab. 1. Koszty montażu w porównaniu z masą wyrobu

<i>Zawór zaporowy typ 218</i>		
Średnica nominalna d_n [mm]	koszt montażu [zł]	masa zaworu [kg]
15	12,00	2,40
20	12,80	2,50
25	14,70	2,80
32	16,80	5,20
40	18,40	5,90
50	22,40	8,10
65	32,70	17,50
80	41,00	23,50
100	66,80	40,80
125	92,50	67,70
150	112,20	86,60
200	201,10	171,40
250	329,50	276,60
300	555,50	456,00

Źródło: opracowanie własne

W zakresie szacowania kosztów montażowy wykorzystana zostanie metoda regresji i

korelacji. Do wyznaczenia modelu posłużą dane dotyczące kosztów montażu zaworów zaporowych. Pod uwagę wzięto koszty pochodzące z ostatniej serii produkcyjnej wszystkich odmian wymiarowych. Dane te w porównaniu z masą zaworów przedstawiono w tabeli 1.

Funkcja kosztów montażu jest opisana równaniem prostej (1), a stałe występujące w tym równaniu są obliczane według wzorów (3) i (4). Stąd obliczone wartości parametrów a i b dla analizowanego przypadku wynoszą:

$$a=1,1725, b=11,4340$$

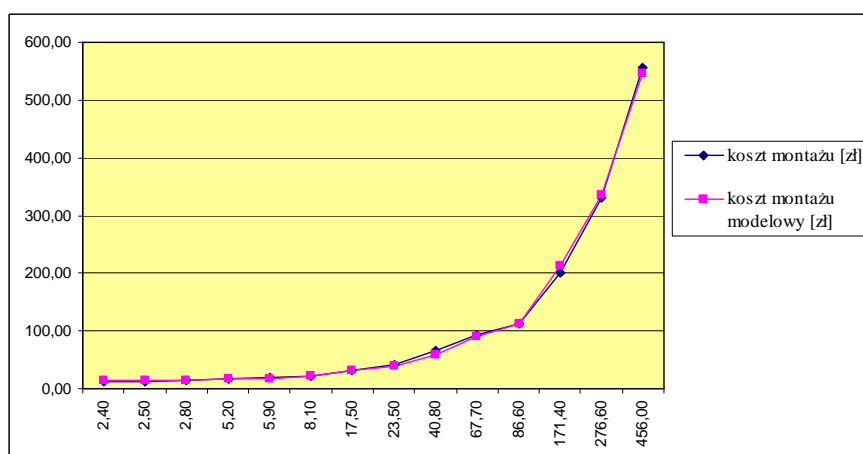
a równanie przybiera postać:

$$K=1,1725m+11,4340 \quad (5)$$

Tab. 2. Wartości obliczonych kosztów modelowych

<i>Zawór zaporowy typ 218</i>			
Średnica nominalna d_n [mm]	masa zaworu m [kg]	koszt montażu K_t [zł]	koszt montażu modelowy K [zł]
15	2,40	12,00	14,25
20	2,50	12,80	14,37
25	2,80	14,70	14,72
32	5,20	16,80	17,53
40	5,90	18,40	18,35
50	8,10	22,40	20,93
65	17,50	32,70	31,95
80	23,50	41,00	38,99
100	40,80	66,80	59,27
125	67,70	92,50	90,81
150	86,60	112,20	112,97
200	171,40	201,10	212,40
250	276,60	329,50	335,75
300	456,00	555,50	546,10

Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Porównanie kosztów montażu empirycznych z kosztem montażu teoretycznym otrzymanym na podstawie modelu

Źródło: opracowanie własne

Dla stwierdzenia, czy zbudowany model jest poprawny należy przeprowadzić jego weryfikację.

Poziom istotności

Określenie poziomu istotności odbywa się na podstawie zależności:

$$I_a = \frac{|a|}{S(a)}, \quad I_b = \frac{|b|}{S(b)} \quad (6)$$

gdzie:

$S(a)$, $S(b)$ – standardowe błędy parametrów a i b

$$S(a) = \frac{S_e}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (m_t - \bar{m})^2}}, \quad S(b) = S_e \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n m_t^2}{n \sum_{t=1}^n (m_t - \bar{m})^2}} \quad (7)$$

gdzie:

S_e – odchylenie standardowe reszt modelu, które obliczane jest według wzoru

$$S_e^2 = \frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n-2} \quad (8)$$

Obliczone odchylenie standardowe wynosi: $S_e = 5,2448$

Wartości standardowych błędów wynoszą: $S(a) = 0,0109$, $S(b) = 1,6707$.

Natomiast poziomy istotności: dla parametru a : $I_a = 107,52$

dla parametru b : $I_b = 6,84$

Z tablic testu t-Studenta dla przyjętego poziomu ufności 0,05 i 12 stopni swobody wartość krytyczna statystyki I wynosi 2,179. Wartości poziomu istotności muszą być większe od krytycznej. W tym przypadku zależność taka istnieje. Oznacza to, że rzeczywiste wartości parametrów istotnie różnią się od zera, co oznacza, że wpływ zmiennej objaśniającej stojącej przy parametrze a w istotny sposób wpływa na zmienną objaśnianą.

Błędy względne

Wartości błędów względnych powinny być jak najmniejsze. Górna dopuszczalna granica tych błędów wynosi 30%. W analizowanym przypadku błędy względne wynoszą:

$$E_a = \frac{S(a)}{a} \cdot 100\% = 0,01\%$$

$$E_b = \frac{S(b)}{b} \cdot 100\% = 24,41\% \quad (9)$$

Współczynnik determinacji

Współczynnik determinacji określa stopień dopasowania modelu do danych empirycznych.

Obliczona wartość współczynnika determinacji wynosi

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (K - \bar{K})^2}{\sum_{t=1}^n (K_t - \bar{K})^2} = 0,983 \quad (10)$$

co oznacza, że model jest dopasowany w 98%.

Test symetrii

Liczba elementów dodatnich wektora reszt powinna być równa liczbie elementów ujemnych, wtedy można stwierdzić, że wektor reszt jest symetryczny. Wektor reszt e_t został przedstawiony w tabeli 3. W analizowanym przypadku liczba elementów dodatnich wynosi 7 i tyle samo wynosi liczba elementów ujemnych, co świadczy o spełnionym warunku testu symetrii.

Test liczby serii

Dla analizowanego przypadku wartości określające minimalną i maksymalną liczbę serii dla przyjętego poziomu ufności 0,05 wynoszą odpowiednio 4 i 12. Liczba serii wynikająca z wartości reszt wynosi 4. Znajdując się na granicy wartości dopuszczalnych można przyjąć, że postać modelu została dobrana poprawnie.

Stacjonarność

Spełnienie tego testu oznacza niezależność wektora reszt od czasu. Stacjonarność obliczono według wzoru:

$$f = \frac{|r_{e,t}| + \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{e,t}^2}} = 0,1622 \quad (11)$$

gdzie:

$r_{e,t}$ – współczynnik korelacji pomiędzy wektorem reszt a kolumną czasu

Współczynnik korelacji dla tego przypadku wynosi 0,0468, a obliczona stacjonarność wynosi 0,1622. Wartość ta powinna być mniejsza od wartości krytycznej odczytanej z tablic t-Studenta, która w tym przypadku wynosi 2,179. Oznacza to, że warunek stacjonarności został spełniony.

Autokorelacja – test Durbina-Watsona

Jest to zależność pomiędzy wektorami reszt z różnych momentów czasowych. Dane niezbędne do przeprowadzenia tej analizy zamieszczone są w tabeli 3.

Tab. 3. Dane niezbędne do analizy autokorelacji testem Durbina-Watsona

Lp	e_t	e_{t-1}	$e-e_{t-1}$	$(e-e_{t-1})^2$	e_t^2
1	-2,25				5,0535
2	-1,57	-2,25	0,68	0,4661	2,4500
3	-0,02	-1,57	1,55	2,3971	0,0003
4	-0,73	-0,02	-0,71	0,5098	0,5344
5	0,05	-0,73	0,78	0,6072	0,0023
6	1,47	0,05	1,42	2,0177	2,1570
7	0,75	1,47	-0,72	0,5208	0,5581
8	2,01	0,75	1,26	1,6000	4,0479

9	7,53	2,01	5,52	30,4207	56,6624
10	1,69	7,53	-5,84	34,1131	2,8453
11	-0,77	1,69	-2,46	6,0542	0,5987
12	-11,30	-0,77	-10,53	110,8647	127,7569
13	-6,25	-11,30	5,05	25,5174	39,0811
14	9,40	-6,25	15,65	244,9504	88,3488
		9,40		Σ 460,0393	Σ 330,0966

Do obliczenia autokorelacji wykorzystuje się zależność.

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} = 1,3937 \quad (12)$$

Wartość współczynnika autokorelacji wynosi 1,3937. Wynik ten jest większy od górnej granicy przedziału $\langle 1,045 ; 1,35 \rangle$ odczytanego dla tego przypadku z tablic testu Durбина-Watsona dla poziomu ufności 0,05. Świadczy to, że autokorelacja nie występuje, co jest zjawiskiem korzystnym. Po przeprowadzeniu weryfikacji opracowanego modelu można stwierdzić, że został on dobrany poprawnie i może służyć w procesie szacowania kosztów montażu zaworu, uzależniając ten koszt od masy całego zaworu, który stanowi parametr kosztu montażu. Przeprowadzona weryfikacja modelu wykazała jego poprawność, co pozwala na zastosowanie tego modelu w procesie ustalenia kosztów montażu projektowanego wyrobu. Po kompletnym procesie montażu uzyskano dla nowego wyrobu należące do analizowanego typoszeregu następujący koszt własny wyrobu (rys. 4.).

Zawór zaporowy 218.80.040.0	
Koszt materiałów bezpośrednich	79,87
Pośrednie koszty materiałowe	1,61
Bezpośrednie koszty obróbki	31,35
Pośrednie koszty obróbki	41,6
Koszty montażu	53,23
Pośrednie koszty montażu	83,93
Koszty badań	28,99
Pośrednie koszty badań	43,45
Koszty bezpośrednie wytworzenia	193,44
Koszty pośrednie wytworzenia	170,59
Koszty wytworzenia	364,03
Koszty rozwoju i marketingu	5,35
Koszty administracji	5,21
Koszty pełnomocnika ds. jakości	1,35
Koszty dyrekcji	6,66
Suma kosztów pośrednich	18,57
Koszt własny	382,6

Rys. 4. Wynik kosztów własnych wyrobu z uwzględnieniem oszacowanego kosztu procesu montażu

4. Podsumowanie

Przedstawiony w niniejszej pracy sposób szacowania kosztów montażu jest prosty i skuteczny, ale przy zachowaniu pewnych warunków. Można w ten sposób w miarę dokładnie oszacować koszty montażu dla wyrobu należącego do rodziny wyrobów, dla których mamy dane historyczne o kosztach montażu. Warunek drugi dotyczy istnienia i poprawnego wyboru właściwych cech mających wpływ na przebieg procesu, a tym samym na jego koszty.

Niestety w większości przypadków mamy do czynienia z montażem nowych wyrobów, odbiegających swoimi cechami od wyrobów wcześniej produkowanych. Nie mamy więc żadnych informacji pomocnych przy wyznaczeniu funkcji kosztów. Dlatego dalsze prace ukierunkowane są na wykorzystanie obiektów elementarnych o charakterze montażowym, które pozwoliłyby na szacowanie kosztów montażu. Powstanie tego typu obiektów byłoby konsekwencją procesu modelowania w systemie CAD, który dla analizowanej grupy wyrobów zostało opracowane w oparciu o metodę obiektów elementarnych. [2]

Literatura

1. Chwastyk P.: Zastosowanie metody obiektów elementarnych w procesie integracji CAD/CAM. *Mechanik* 11/2007, s. 954-955.
2. Chwastyk P., Kołosowski M.: Zastosowanie kosztowych obiektów elementarnych w procesie szacowania kosztów wytwarzania. *Komputerowo Zintegrowane Zarządzanie*, Tom I, WNT, Warszawa 2007.
3. Łunarski J., Szabajkiewicz W.: *Automatyzacja procesów technologicznych montażu maszyn*. WNT, Warszawa 1993.

Dr inż. Piotr CHWASTYK
Dr inż. Dominika BINIASZ
Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów
Politechnika Opolska
45-370 Opole, ul. Ozimska 75
tel./fax.: (077) 423 40 34
e-mail: chwastyk@po.opole.pl

Dr inż. Mariusz KOŁOSOWSKI
Instytut Zarządzania
Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Nysie
48-300 Nysa, ul. Grodzka 19
tel.: (0-77) 409 11 73
e-mail: kolos@pwsz.nysa.pl
mariusz_kolosowski@pwsz.nysa.pl