ZARZĄDZANIE JAKOŚCIĄ PRZEZ ALOKACJĘ TOLERANCJI CHARAKTERYSTYK PRODUKTU

Maciej SZADKOWSKI, Jan SZADKOWSKI

Streszczenie: autorzy traktują alokację tolerancji jako problem techniczno-menedżerski, wymagający informacji pochodzącej zarówno z badań rynku i z analiz marketingowych, jak i wynikający z analizy i badań zdolności procesów wytwarzania. Racjonalny wybór tolerancji wiąże się z rozwiązaniami kompromisowymi – pomiędzy oczekiwaniami klienta i możliwościami oraz kosztami procesów wytwarzania.

Słowa kluczowe: zarządzanie jakością, tolerancje charakterystyk jakości, alokacja tolerancji.

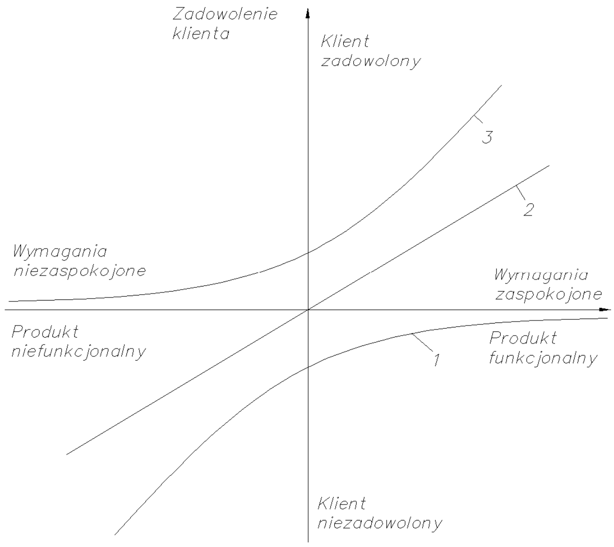
1. Wstęp

Zarządzanie jakością, mające na celu jak najlepsze zaspokajanie potrzeb klienta, zmierza do oferowania produktów, których charakterystyki jakości (dane techniczne, trwałość, niezawodność, bezpieczeństwo, walory estetyczne itp.) powinny odpowiadać wymaganiom podsumowanym wykresem Kano – rys. 1 [1, 2] – i ujętych w trzech grupach:

- grupa 1 obejmuje wymagania ujęte charakterystykami, które bezwzględnie muszą być spełnione i w związku z tym są traktowane jako oczywiste;
- grupa 2 obejmuje wymagania wyrażone bezpośrednio przez klienta;
- grupa 3 obejmuje charakterystyki , co do których klient nie wyraża życzeń , ale które mogą przyczynić się do zwiększenia jego zadowolenia.

Te charakterystyki jakości, które dają się wyrazić ilościowo , są obarczane tolerancjami – przedziałami zawierającymi dopuszczalne wartości charakterystyki, przy czym dobrze wiadomo, że im węższe są tolerancje, to tym trudniej jest produkt wytworzyć i tym wyższe są koszty wytwarzania, natomiast jakość produktu jest na ogół tym lepsza.

Na jakość użytkową produktu składają się w dużej mierze jego charakterystyki funkcjonalne, tworzące jego jakość „zewnętrzną” – związaną z zaspokajaniem potrzeb klienta oraz charakterystyki „wewnętrzne”, tworzące w procesach wytwarzania charakterystyki funkcjonalne. Typowym przykładem są tutaj charakterystyki geometryczne – wymiary części, z których są zbudowane zespoły maszyn i aparatury. Tolerancje wymiarów części są elementami jakości wewnętrznej, natomiast tolerancje wymiarów nazywanych w budowie maszyn zamykającymi, zależnymi lub funkcjonalnymi [3, 4], tworzą jakość użytkową. Przedstawione w artykule rozważania są ilustrowane zależnościami ilościowymi wziętymi z zakresu alokacji tolerancji wymiarów części maszyn, jednak alokacja tolerancji innych charakterystyk (różnych wielkości fizykalnych i innych) podlega w dużej mierze prawidłowościom podobnego typu, o czym świadczą liczne pozycje literatury, np. [4, 5, 6, 7].



Rys. 1. Wykres Kano; 1 – charakterystyki produktu uważane za oczywiste i zrozumiałe sam przez się, 2 – charakterystyki oczekiwane i wyrażane przez klienta, 3 – charakterystyki innowacyjne, których „odkrywanie” przynosi klientowi szczególną satysfakcję i które są szczególnie atrakcyjne [1, 2].

2. Alokacja tolerancji

Jeżeli przez Z_i oznaczyć i-tą ($i = 1, 2, ..., m$) charakterystykę funkcjonalną produktu (np. wymiar zależny wpływający w istotny sposób na właściwości funkcjonalne produktu), to zależy ona od pewnych wielkości niezależnych W_j ($j = 1, 2, ..., n$), np. od wymiarów składowych pewnych części składających się na produkt:

$$Z_i = f_i(W_1, W_2, \ldots, W_n) \tag{1}$$

Przyjmując symbolikę wektorowo-macierzową, z wektorami $\boldsymbol{Z} = (Z_1, Z_2, ..., Z_m)$, $\boldsymbol{W} = (W_1, W_2, ..., W_n)$ oraz $\boldsymbol{f} = (f_1, f_2, ..., f_m)$ otrzymuje się

$$\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{W}) \tag{2}$$

Zależności dla tolerancji (które są oznaczone symbolem T z odpowiednim indeksem) są zwykle ujmowane po rozwinięciu funkcji $\boldsymbol{f}$ na szereg Taylora i pozostawieniu tylko członu liniowego, w sposób następujący:

– dla przypadku zamienności całkowitej

$$\boldsymbol{T}_Z \geq \boldsymbol{F}\ \boldsymbol{T}_W^{'} \tag{3}$$

– dla zamienności niecałkowitej

$$\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{Z}}^{2} \geq \hat{\boldsymbol{F}}\left[\left(\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{W}}^{2}\right)'\right] \tag{4}$$

gdzie $\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{Z}} = (T_{Z1}, T_{Z2}, ..., T_{\boldsymbol{Zm}})$; $\boldsymbol{F}$ jest macierzą prostokątną $m \times n$ o składnikach $\left|\frac{\partial f_i}{\partial W_j}\right|$;

$\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{Z}}^{2} = \left(T_{Z1}^{2}, T_{Z2}^{2}, \ldots, T_{\boldsymbol{Zm}}^{2}\right)$; $\hat{\boldsymbol{F}}$ jest macierzą prostokątną $m \times n$ o składnikach $\left(\frac{\partial f_i}{\partial W_j}\right)^2 e_{ij}$ (e_{ij} jest współczynnikiem zależnym od rozkładu statystycznego i-tej wielkości funkcjonalnej i j-tej wielkości niezależnej); znak „prim” jest symbolem transpozycji.

Tradycyjne podejście do zadania alokacji tolerancji daje się sformułować tak: dany jest wektor $\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{Z}}$ oraz macierz $\boldsymbol{F}$ lub $\hat{\boldsymbol{F}}$, należy określić wartości liczbowe składowych wektora $\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{W}}$ lub $\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{W}}^{2}$. Składowe $\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{Z}}$ lub $\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{Z}}^{2}$ dobiera się zwykle tak, aby realizować wymagania klienta wg krzywych 1 i 2 na wykresie Kano, natomiast alokacji tolerancji wielkości niezależnych dokonuje się przez minimalizację bądź funkcji kosztu k (stosowanej od połowy wieku XX):

$$k = \sum_{j=1}^{n} k_j (T_{Wj}) \to \min \tag{5}$$

w której poszczególne funkcje składowe k_j są monotonicznie malejącymi funkcjami tolerancji wielkości niezależnych, bądź też funkcji g

$$g = -\sum_{j=1}^{n} \lg(T_{Wj} - T_{Wj}^{*}) \to \min \tag{6}$$

albo funkcji

$$\hat{g} = -\sum_{j=1}^{n} \lg\left[T_{Wj}^{2} - \left(T_{Wj}^{*}\right)^{2}\right] \to \min \tag{7}$$

zaproponowanych w pracy [8], w oparciu o rozważania wykorzystujące elementy teorii gier kooperacyjnych (w tym zwłaszcza prace J. F. Nash’a i J. Harsanyi’ego, którzy wraz z R. Selten’em otrzymali w 1994 r. nagrodę Nobla w zakresie nauk ekonomicznych). Minimalizacja funkcji celu (5) albo (6) albo (7) przebiega przy ograniczeniach (3) albo (4). Wielkości T_{Wj}^{*} są granicznymi wartościami tolerancji wielkości niezależnych, zależnymi od trudności uzyskiwania odpowiednio małych tolerancji w procesach wytwarzania.

Zasób informacji niezbędny do jednoznacznego określenia funkcji (6) albo (7) jest znacznie mniejszy niż niezbędny do określenia funkcji (5). Funkcje typu (5) są trudne do zidentyfikowania i rzadko spotykane w praktyce. Przykłady alokacji wykorzystujące teorię gier są podane w pracach [4, 8, 9, 10].

Możliwe jest tu również podejście uwzględniające funkcję strat Taguchi’ego [4, 7]. O ile w podejściu tradycyjnym składowe wektora $\boldsymbol{T}_{\boldsymbol{Z}}$ są traktowane jako wielkości stałe w pewnym przedziale czasu , to w podejściu Taguchi'ego istnienie tolerancji $\boldsymbol{T_Z}$ jest źródłem strat społecznych, które mogłyby być wyeliminowane, gdyby – biorąc rzecz formalnie – składowe $\boldsymbol{T_Z}$ zostały zredukowane do zera, co oznaczałoby oczywiście także zerowe wartości składowych wektora $\boldsymbol{T_W}$. W takim przypadku wprowadzona przez Taguchi'ego funkcja strat [2, 5, 6] przyjmowałaby wartość zero. Zerowe wartości $\boldsymbol{T_Z}$ nie są technicznie realne, a w filozofii Taguchi'ego można widzieć jedynie tendencję do postępującego zawężania wartości składowych $\boldsymbol{T_Z}$, co znajduje odbicie we współczesnych modelach alokacji tolerancji, przy czym zostały zaproponowane dwie drogi:

– minimalizacja funkcji kosztu (5) uzupełnionej funkcją strat [7];
– minimalizacja funkcji (6) albo (7) uzupełnionej funkcją strat [4].

Postać funkcji strat może być przyjęta zgodnie z jedną z jej typowych postaci [2, 5, 6]; np. w pracy [4], dla przypadku zamienności całkowitej, przyjęto ją w postaci

$$L = \sum_{i=1}^{m} \frac{L_{\max i}}{\left(T_{Zi}^{*}\right)^{2}} \left(T_{Zi}\right)^{2} \tag{8}$$

gdzie $L_{\max\ i}$ wyraża stratę społeczną wynikającą z wykorzystania przez wytwórcę całego pola tolerancji T_{Zi}^{*} (ten ostatni symbol oznacza największą akceptowalną wartość T_{Zi}). Wtedy minimalizacja funkcji

$$g_L = g + L \to \min \tag{9}$$

przy ograniczeniach (6) zapewnia zarówno utrzymanie dla rozwiązania tego problemu w postaci wektora $\boldsymbol{T_W^{**}} = \left(T_{W1}^{**}, T_{W1}^{**}, \ldots, T_{Wn}^{**}\right)$ warunków $T_{\boldsymbol{W}j}^{**} \geq T_{\boldsymbol{W}j}^{*}$ jak i ograniczenie tolerancji wielkości funkcjonalnych do wartości $T_{\boldsymbol{Z}i}^{**} \leq T_{\boldsymbol{Z}i}^{*}$ (tym bardziej im większe są wartości $L_{max\ i}$). Podobny model można utworzyć dla zamienności niecałkowitej – przykład numeryczny jest podany w pracy [4].

3. Problem zdolności procesu (operacji)

Możliwie wyczerpujące ujęcie zdolności (capability) operacji ujmuje formuła dla C_{pmk} – np. [9]

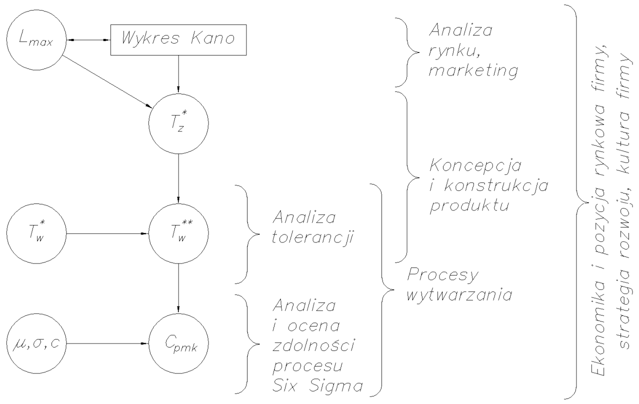
$$C_{pmk} = \min\left\{ \frac{USL-\mu}{3\sqrt{\sigma^2+(\mu-c)^2}}, \frac{\mu-LSL}{3\sqrt{\sigma^2+(\mu-c)^2}} \right\} \tag{10}$$

gdzie *USL* i *LSL* stanowią kolejno górną i dolną wartość graniczną charakterystyki jakości, μ jest średnią statystyczną wartością uzyskiwaną w operacji, σ – odchyleniem standardowym, c – wartością idealną (target) wg Taguchi'ego (sytuowaną zwykle w środku pola tolerancji $T_{\boldsymbol{W}j}^{**} = USL_j - LSL_j$. Jeżeli 1,0 ≤ C_{pmk} ≤ 1,33 udział wadliwych produktów operacji wynosi 66-2700 części na milion (ppm) , co oznacza potrzebę bardzo starannego bieżącego sterowania przebiegiem operacji, a sytuacja nie jest zadowalająca; 1,33 ≤ Cpmk ≤ 1,67 pociąga za sobą 0,54 – 66 ppm wadliwych produktów i mniejsze

wymagania co do bieżącego sterowania; przy 1,67 ≤ C_{pmk} ≤ 2,0 jest 0,002 – 0,54 ppm wadliwych produktów i proces przebiega bardzo dobrze; C_{pmk} > 2,0 jest określane jako sytuacja doskonała (super, co odpowiada ideom *Six Sigma*).
Uwzględnienie wartości C_{pmk} podkreśla sprzeczności pomiędzy oczekiwaniami klienta (krzywe 2 i 3 na wykresie Kano i wynikające z tego wąskie tolerancje $\boldsymbol{T_Z^{**}}$ i $\boldsymbol{T_W^{**}}$) i trudnościami wytwarzania (odpowiednio wysoka wartość C_{pmk} wymaga małych wartości σ i utrzymania wartości średnich w pobliżu wartości idealnych).

4. Zarządzanie jakością przez alokację tolerancji – wnioski

Wyniki rozważań artykułu podsumowuje rys. 2.



Rys. 2. Alokacja tolerancji $\boldsymbol{T_W^{**}}$ na tle zagadnień poruszanych w artykule. Symbole umieszczone w okrągłych polach oznaczają wektory o składowych okresowych i skomentowanych w tekście.

Naturalnym dążeniem jest optymalna alokacja tolerancji, możliwa – jak dotąd – w dosyć ograniczonym zakresie, głównie przez wykorzystanie funkcji celu (5) albo (9). Subtelności związane z wykresem Kano mogą być uwzględniane tylko w sposób jakościowy. Problem włączenia do modeli optymalizacji wskaźników C_{pmk} jest obecnie przedmiotem wielu prac – np. [11, 12, 13], jednak proponowane rozwiązania są stale zbyt wycinkowe.

Alokacja tolerancji rysuje się tutaj jako zadanie o charakterze techniczno-menedżerskim, podlegające – zgodnie z rys. 2 – zarówno „naciskowi z góry", wywieranemu – koniec końców – przez klienta, jak i wywierające „nacisk w dół" – na menedżerów i inżynierów produkcji. Jest więc związane zarówno z analizą rynku i marketingiem, jak i z wiodącymi koncepcjami kształtowania polityki firmy, jak np. *Lean Manufacturing* i *Six Sigma* oraz z wykorzystaniem metod Taguchi'ego [2, 4, 5, 6, 7], metod Shainina [14] i innych. Otwiera się tutaj pole do stosowania metod heurystycznych i metod sztucznej inteligencji [15], jak również współczesnych metod rachunku kosztów.
Na podstawie powyższego można przedstawić następując wnioski:

1) W wyniku działań należących do sfery techniczno – menedżerskiej istnieją możliwości uzyskania tolerancji niezależnych charakterystyk jakości, które są funkcjami:

– tolerancji osiągalnych w procesach wytwarzania $\boldsymbol{T}_W^*$;
– parametrów funkcji strat, uwzględniającej interes społeczny prowadzący do zawężania tolerancji charakterystyk funkcjonalnych $\boldsymbol{T}_Z^{**}$;
– parametrów zdolności operacji wytwórczych C_{pmk}, wyrażających dążenie do osiągania doskonałości procesów wytwarzania;
– wykorzystanie powyższych możliwości wymaga opracowania metodyki określania wartości tolerancji osiągalnych i parametrów funkcji strat, a także pogłębienia znajomości zasad wyboru parametrów zdolności w konkretnych procesach wytwarzania.

2) Ujęcie tej całości w jeden sformalizowany model matematyczny nie zostało dotąd wykonane, jednak pewne cząstkowe rezultaty ilościowe i jakościowe mogą skutecznie wspomagać decyzje menedżerskie.

Literatura

1. Tseng M.M., Kjellberg T., Lu S. C.-Y.: Design in the New e-Commerce Era. Annals of the CIRP, Vol. 52/2/2003, p. 509-519.
2. Li M.-H. C.: Quality Loss Functions for the Measurement of Service Quality. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 21, 2003, p. 29 – 37.
3. A strategy for solving functional equations. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 24, 2004, p. 461 – 468.
4. Szadkowski J.: Extended Model of Tolerances Optimisation. Proc. of International Congress of Precision Machining. Usti nad Labem, 2001, p. 209 – 213.
5. Ross Ph. J.: Taguchi Techniques for Quality Engineering. Mc Graw – Hill, New York, 1996.
6. Taguchi G., Elsayed E. A.: Quality Engineering in Production Systems. Mc Graw – Hill, New York, 1989.
7. Choi H.-G. R., Park M.-H., Salisbury E.: Optimal Tolerance Allocation with Loss Function. Transactions of the ASME , Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 122, 2000, p. 529-535.
8. Szadkowski J.: Ekonomiczne i technologiczne przesłanki wyboru tolerancji w układach łańcuchów wymiarowych. Politechnika Krakowska, Zeszyt Naukowy Nr 4, Kraków, 1969.
9. Szadkowski J.: Manufacture Oriented Tolerancing in Dimension Systems. Annals of Danube Adria Association for Automation and Manufacturing , Vienna University of Technology, Vienna 1999, p. 541-542.
10. Gondek L.: Analiza dokładności geometrycznej manipulatora robotów przemysłowych. Wyd. Politechniki Krakowskiej, Seria Mechanika, Monografia Nr 329, Kraków 2006.
11. Pearn W.L., Shu M.-H.: Measuring manufacturing capability based on lower confidence bounds of Cpmk applied to current transmitter process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.23, 2004, p. 116-125.
12. Huang M. L., Chen K. S.: Capability Analysis for a Multi – Process Product with Bilateral Specifications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 21, 2003, p. 801-806.

13. Yu K. T., Shen S. H., Chen K. S.: The evaluation of process capability for a machining center. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Vol. 33, 2007, p. 505-510.
14. Bhote K. R.: World Class Quality. Using Design of Experiments to Make it Happen. AMACOM, New York , 1991.
15. Knosala R. i Zespół: Zastosowania metod sztucznej inteligencji w inżynierii produkcji. WNT, Warszawa, 2002.

Mgr Maciej SZADKOWSKI
MIIS S.C.
43-300 Bielsko-Biała, ul. mjra Sucharskiego 46

Prof. dr hab. inż. Jan SZADKOWSKI
Em. prof. zwycz. ATH w Bielsku-Białej
43-300 Bielsko-Biała, ul. Willowa 2
e-mail: ktmia@ath.bielsko.pl