

DOBÓR I OPTIMALIZACJA RÓŻNORODNOŚCI WARTOŚCI WYMIARÓW CECH KONSTRUKCYJNYCH W TYPOSZEREGACH MASZYN

SELECTION AND OPTIMIZATION OF THE DIVERSITY OF VALUE DIMENSIONS OF CONSTRUCTIONAL FEATURES FOR SERIES OF TYPES

Piotr Gendarz – Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska

Podstawowym celem pracy jest taki dobór cech konstrukcyjnych w poszczególnych typowościach typoszeregu, aby uzyskać identyczne stany: fizyczne, stereomechaniczne oraz proste jak w konstrukcji wzorcowej. Ten dobór cech konstrukcyjnych zintegrowano z optymalizacją różnorodności ilościowych cech konstrukcyjnych poprzez agregację wartości wymiarów. Agregacja wpływa na licznosc typowości w typoszeregach konstrukcji, a więc możliwość tworzenia jak największej liczby złożów ograniczoną ich liczbą.

The main goal of this work is the selection of constructional features in the series of types to get the same states: physical, stereo-mechanical and simple as in the master constructions. The selection of constructional features are integrated with the optimization of quantitative constructional features by aggregating the value of dimensions. Aggregation effect on the size of series of types of construction, and therefore possibility of creating the greatest number of assemblies with a limited their number.

Wstęp

Najwyższą formą uporządkowania rodziny konstrukcji [2] są typoszeregi i systemy modułowe konstrukcji. Dają one możliwość jak najszerzego pokrycia spektrum zapotrzebowań na określoną klasę środków technicznych i zapewniają seryjność wytwarzania, a tym samym niskie koszty wytwarzania [2, 5]. Podstawowymi narzędziami tworzenia typoszeregów konstrukcji jest dobór wartości wymiarów na podstawie teorii podobieństwa konstrukcyjnego oraz optymalizacja zróżnicowania ilościowych cech konstrukcyjnych rodziny konstrukcji (rys. 1).

Zagadnienie przedstawione w artykule dotyczy dwóch przyporządkowań γ oraz δ (rys. 1). Celem stosowania teorii podobieństwa konstrukcyjnego jest utworzenie uporządkowanej rodziny konstrukcji np. typoszeregu konstrukcji na podstawie konstrukcji wzorcowej, czyli jak dla cech charakterystycznych cch_{ic}^u dobrać optymalne wartości wymiarów $w_{il}^{e_j}$ ($j = 1, jz$). Przyporządkowanie to w procesie tworzenia uporządkowanych rodzin konstrukcji (typoszeregów, systemów modułowych konstrukcji) nazwano przyporządkowaniem γ [2],

$$cch_{ic}^u \rightarrow w_{il}^{e_j} (j = 1, jz) \quad (1)$$

Optymalizacja zróżnicowania ilościowych cech konstrukcyjnych w tworzeniu uporządkowanych rodzin konstrukcji polega na utworzeniu klas konstrukcji elementów, wyborze reprezentantów klas oraz zachowaniu tożsamości wymiarów sprzężonych między współdziałającymi konstrukcjami elementów.

Dobór ilościowych cech konstrukcyjnych na podstawie teorii podobieństwa konstrukcyjnego

Ze względu na formalizację zapisu wyróżniono ze zbioru cech charakterystycznych CCH_c^u ilościowe cechy charakterystyczne nazywane parametrami rodziny konstrukcji Pa_a^u , ($a = 1, az$). Macierz parametrów pa_{ia}^u stanowi **zmiennę**

niezależną przy wyznaczaniu ilościowych cech konstrukcyjnych elementów $x_{ia}^u = p_{ia}^u$. Dobór cech konstrukcyjnych elementu dokonywany jest ze względu na potrzebę p_u^i , reprezentowaną przez wiersz macierzy parametrów nazywany zunifikowanymi parametrami.

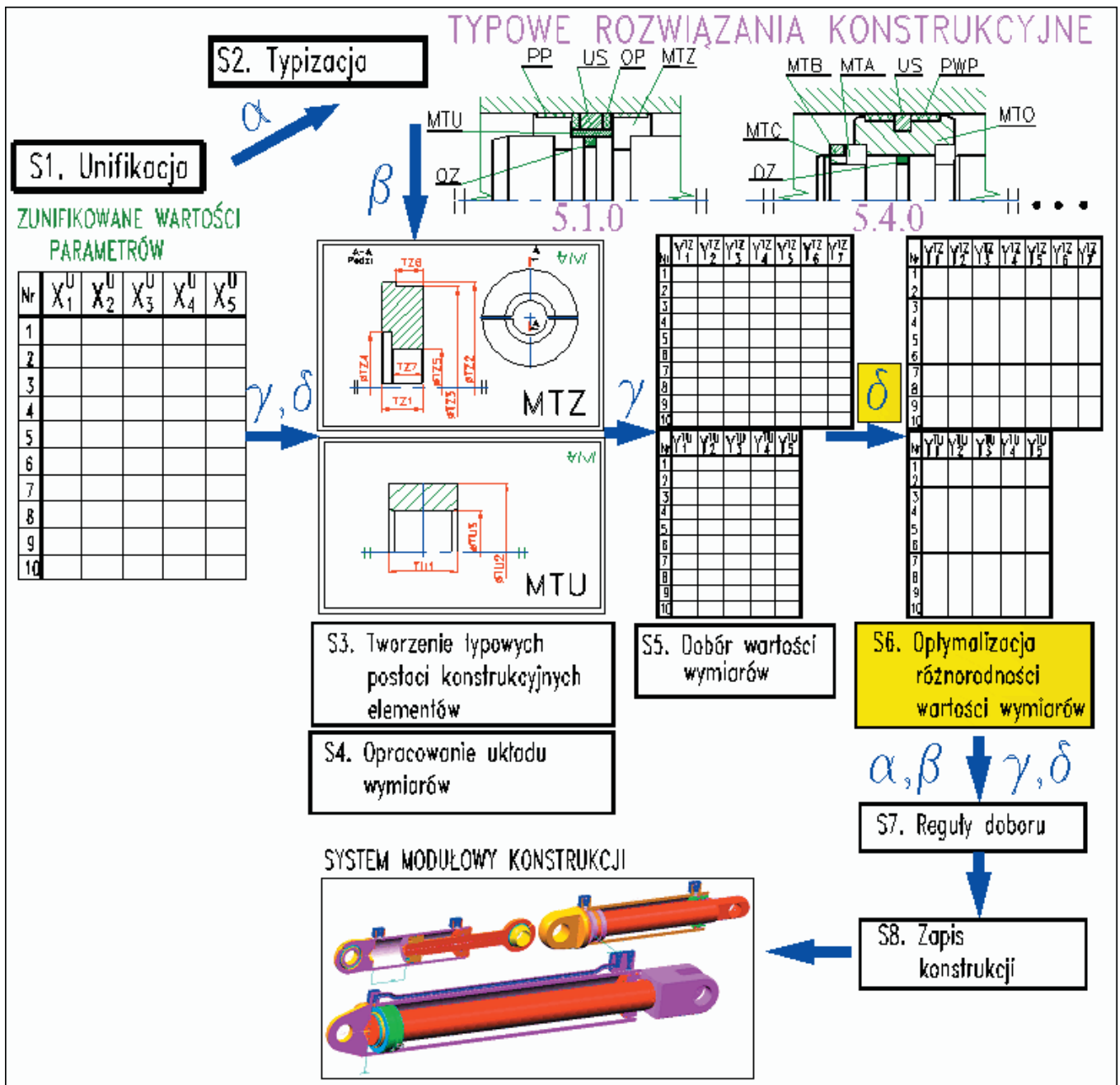
Ze względu na wartości parametrów, dobierane są ilościowe cechy konstrukcyjne (wartości wymiarów geometrycznych i tworzywowych) poszczególnych elementów wytwarzanych $e_j, y_{ml}^{e_j}$ ($m = i, iz; l = 1, lv_j$). Przestrzeń potrzeb rodziny konstrukcji opisywana jest przez zunifikowane wartości parametrów, czyli ograniczone i uporządkowane wartości parametrów przyjęte jako obowiązujące przez określony czas. Narzędzia wspomagające tworzenie zunifikowanych parametrów to: prognozowanie, dostosowanie wartości parametrów do szeregów liczb normalnych, dostosowanie parametrów do parametrów współdziałających środków technicznych [2, 6]. Przykład zunifikowanych parametrów siłownika hydraulicznego przedstawiono na rysunku 2, jako zmienne niezależne przyporządkowania γ .

Metoda doboru wartości wymiarów na podstawie podobieństwa konstrukcyjnego ma swoje źródła w teorii podobieństwa fizycznego [1]. Modele fizyczne budowano w odpowiedniej skali, poddawano je badaniom, symulując złożone zjawiska fizyczne. Na tej podstawie tworzono nowe konstrukcje środków technicznych, np. badając model samolotu wykonanego w odpowiedniej skali, w tunelu aerodynamicznym, modyfikowano geometryczną postać konstrukcyjną kadłuba i jego proporcje wymiarowe.

W procesie tworzenia uporządkowanych rodzin konstrukcji z zastosowaniem podobieństwa konstrukcyjnego modelowi odpowiada: wzorcowa konstrukcja

$$ks_0 \{y_{ol}^{e_j}; (l = 1, lv_j)(j = 1, jz)\} \text{ wraz z wzorcowymi parametrami } \bar{X}_0 \{x_{0a}; (a = 1, az)\}.$$

Na ich podstawie tworzy się konstrukcje geometrycznie podobne



Rys. 1. Model przyporządkowań między cechami w uporządkowanych rodzinach konstrukcji

$ks_i \{y_{il}^{e_j}; (l = 1, lv_j)(j = 1, jz)\} \in RK_n$,
odpowiednio do zunifikowanych parametrów

$\bar{X}_i^u \{x_{ia}^u; (i = 1, iz)(a = 1, az)\}$,
spełniając w nich identyczność relacji sprzężeń i przekształceń (rys. 3).

Zdefiniowano dwie podstawowe liczby podobieństwa między cechami konstrukcji nowej ks_i a wzorcowej ks_0 :

podobieństwo parametru $\phi_{ia}^u = \frac{x_{ia}^u}{x_{0a}}$, (2)

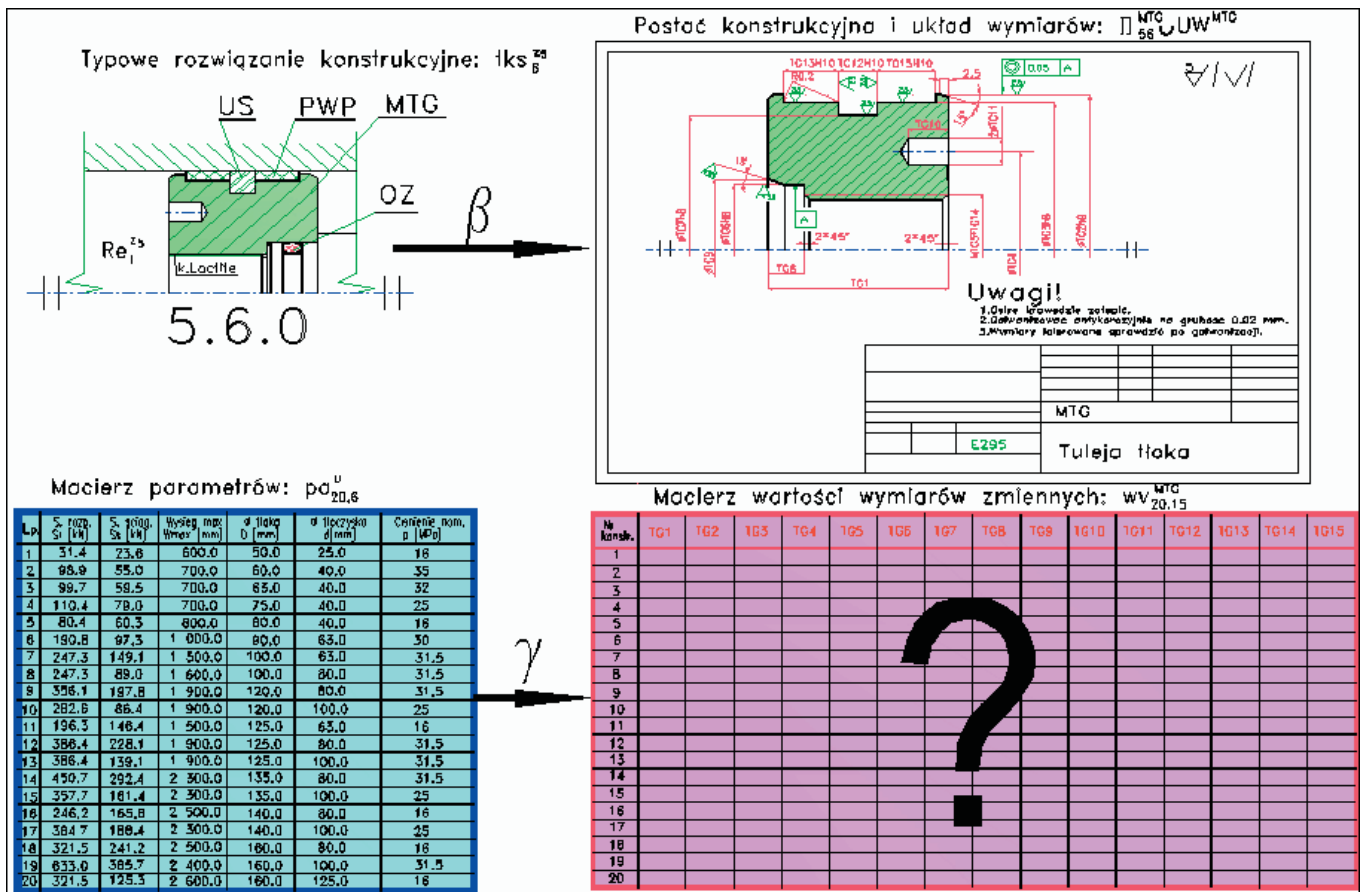
podobieństwo wymiaru $\phi_l^{e_j} = \frac{y_{il}^{e_j}}{y_l^{e_j}}$. (3)

W teorii podobieństwa konstrukcyjnego dąży się do takiego doboru cech konstrukcyjnych, aby uzyskać relacje sprzężenia i przekształcenia systemu (rys. 4a), w nowej konstrukcji,

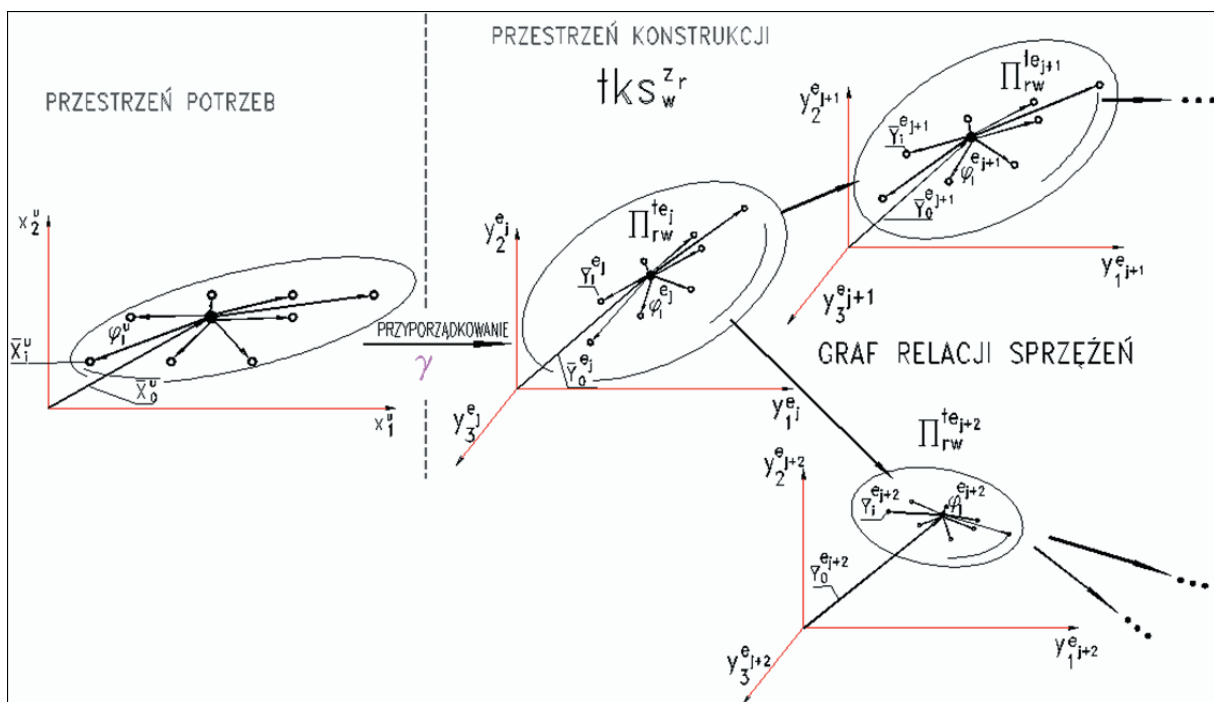
takie jak w konstrukcji wzorcowej, tworząc w ten sposób optymalnie zróżnicowane zbiory konstrukcji. Izomorficznym relacjom sprzężeń i przekształceń, wyróżnionym w strukturze systemowej rodziny konstrukcji, przyporządkowuje się modele fenomenologiczne oraz zależności fizyczne, które opisywane są w formie funkcji matematycznych (rys. 4b). Funkcje te są podstawą doboru cech konstrukcyjnych, $y_{il}^{e_j} (l = 1, lv_{is}) = f_p(x_{ia}^u)$.

Zachowując identyczność stanów: fizycznych, stereomechanicznych i prostych opisanych za pomocą funkcji matematycznych dla poszczególnych relacji struktury systemowej rodziny konstrukcji tworzone są **warunki podobieństwa konstrukcyjnego** [3].

Podstawą odniesienia jest konstrukcja wzorcową [4]. Konstrukcja wzorcową (ks_0) to konstrukcja praktycznie zweryfikowana pod względem działania oraz poddana optymalizacji, którą zweryfikowano ze względu na wytwarzanie, a uzyskany wytwór był poddany weryfikacji doświadczalnej (badaniom



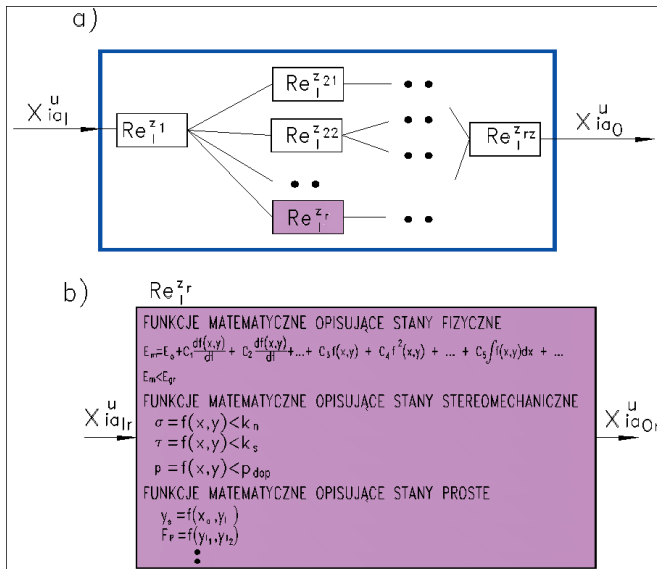
Rys. 2. Przyporządkowanie β oraz γ



Rys. 3. Model doboru ilościowych cech konstrukcyjnych na podstawie podobieństwa konstrukcyjnego

prototypowym). Konstrukcja może być przyjęta jako konstrukcja wzorcowa, gdy odpowiadający jej wytwór najlepiej spełnił kryteria weryfikacji doświadczalnej. Ze względu na dokładność obliczeń wartości wymiarów metodą podobieństwa konstrukcyjnego, zaleca się przyjmować konstrukcję wzorcową ze środkowego zakresu uporządkowanych wartości parametrów.

Wartości parametrów, jak również wartości ilościowych cech konstrukcyjnych elementów, na podstawie warunków podobieństwa konstrukcyjnego oraz parametrów i wymiarów konstrukcji wzorcowej, mogą być obliczane według następujących zależności:



Rys. 4. Matematyczny opis stanów przyszłego środka technicznego

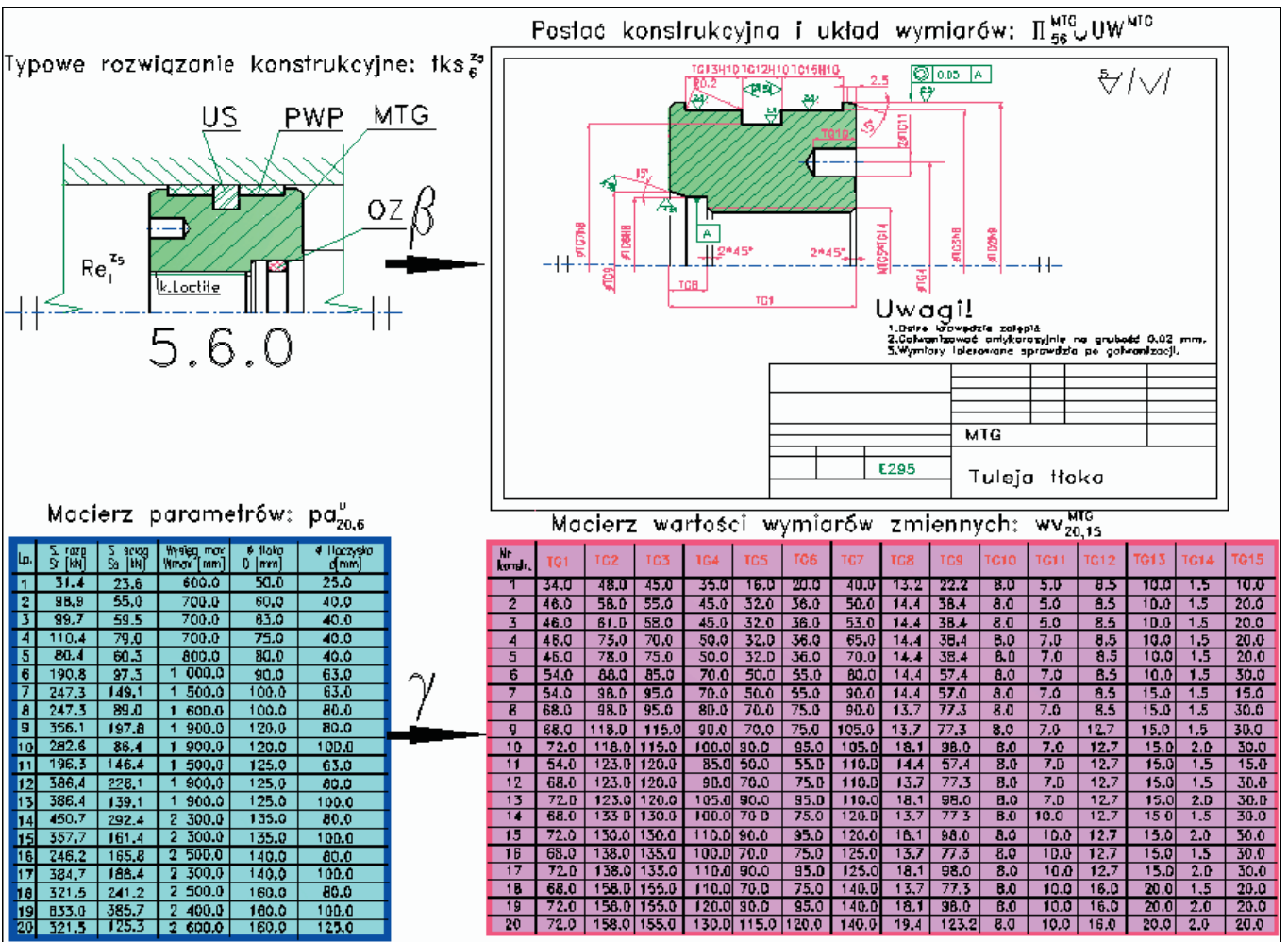
i – wartość wykładnika potęgowego określająca odległość od konstrukcji wzorcowej (przyjmuje wartości $i = \dots -2, -1, 0, 1, 2, \dots$, gdzie wartość $i = 0$ – odpowiada konstrukcji wzorcowej).

Wartości parametrów i i wymiarów mogą być obliczane, jak powyżej, analitycznie lub graficznie za pomocą nomogramów ze współrzędnymi w skali logarytmicznej [5].

Wynikiem są wartości wymiarów uzyskane na podstawie podobieństwa konstrukcyjnego, które dodatkowo zmodyfikowano ze względu na dostosowanie się do wymiarów elementów katalogowych i znormalizowanych. Przykładem są wartości wymiarów tulei tłoka przedstawione na rysunku 5.

Optymalizacja różnorodności wartości wymiarów – przyporządkowanie δ

W uporządkowanych rodzinach konstrukcji, z jednej strony zmierza się do jak najmniejszej liczby typowielkości (modułów konstrukcyjnych), co zwiększa seryjność wytwarzania, a z dru-



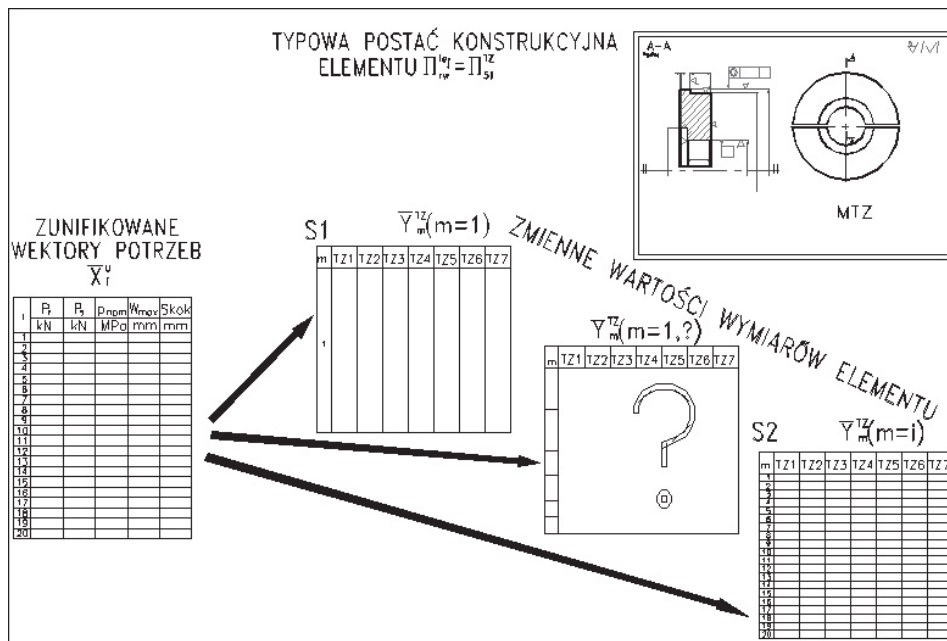
Rys. 5. Wynik przyporządkowania γ

• zunifikowane wartości parametrów: $x_{ia} = x_{0a} \cdot (\phi_i^u)^i$, (4)

• wartości wymiarów: $y_{il}^e = y_{0l}^e \cdot (\phi_i^e)^j$, (5)

gdzie: x_{0a} – wartość a-tego parametru wzorcowego,
 y_{0l} – wartość l-tego wymiaru konstrukcji wzorcowej,

giej strony do minimalizacji przewymiarowania (zawyżania wartości wymiarów), co skłania do tworzenia jak najliczniejszego zbioru typowielkości (modułów konstrukcyjnych) (rys. 6). Aby zilustrować problem agregacji, dla zunifikowanych wektorów potrzeb i typowej postaci konstrukcyjnej elementu Π_{rw}^{te} ,

Rys. 6. Ilustracja skrajnych stanów przyporządkowania δ

rozważa się jako wynik przyporządkowania δ dwa następujące skrajne stany (rys. 6):

S1 całemu zakresowi potrzeb odpowiada jedna uporządkowana konstrukcja,

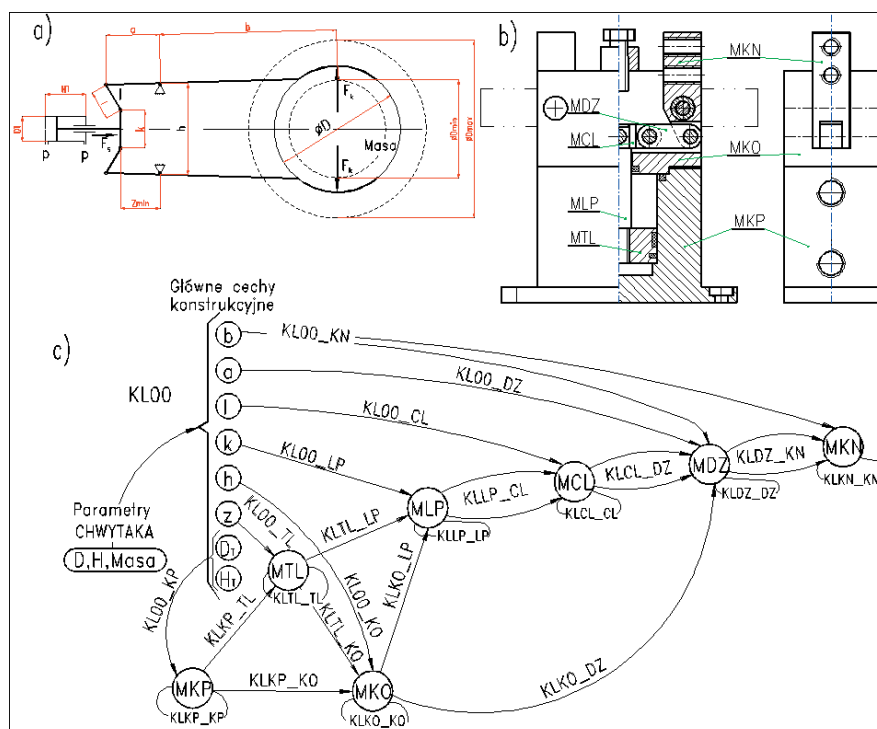
S2 każdemu wierszowi potrzeb odpowiada jedna uporządkowana konstrukcja.

Stan **S1** jest korzystny głównie ze względu na seryjność wytwarzania oraz wymiennosc elementów, natomiast stan **S2** jest korzystny ze względu na minimalizację przewymiarowania konstrukcji, a więc minimalizację masy i maksymalne wyżęcenie materiału. W celu rozwiązania powyższej antynomii

zastosowano teorię automatycznej klasyfikacji z zachowaniem relacji sprzężeń między współdziałającymi elementami.

Relacje sprzężeń między wymiarami

W optymalizacji zróżnicowania wartości wymiarów, niezbędne jest zachowanie relacji sprzężeń między wymiarami. Spełnia się przez to możliwość kombinatorycznego doboru różnych konstrukcji elementów, minimalizując ich liczbę i obejmując nimi jak najszerszy zakres potrzeb. Podstawą zapisu relacji sprzężeń jest graf relacji sprzężeń $G(\Pi_{i,j}^{T_1})$. Przykład takiego grafu rodziny konstrukcji chwytaków kleszczowych przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Graf relacji sprzężeń chwytaka kleszczowego: a – model fenomenologiczny, b – rozwiązanie konstrukcyjne, c – graf relacji sprzężeń

Węzłom grafu odpowiadają konstrukcje elementów, natomiast ramionom grafu odpowiadają relacje między wymiarami sprzężonymi. Wśród relacji sprzężeń między wymiarami wyróżnia się sprzężenia zewnętrzne oraz wewnętrzne (rys. 8).

Sprzężenia zewnętrzne ($SP_{e_{j-1}-e_j}$) to sprzężenia między wymiarami współdziałających elementów. Wyróżniono sprzężenia zewnętrzne – wejściowe między wymiarami elementów:

$$(W_l^{e_{j-1}} (l = 1, lv_{j-1}) \uparrow W_l^{e_j} (l = 1, lv_j))$$

oraz sprzężenia zewnętrzne – wyjściowe między wymiarami elementów

$$(W_l^{e_j} (l = 1, lv_j) \downarrow W_l^{e_{j-1}} (l = 1, lv_{j-1})).$$

Natomiast **sprzężenia wewnętrzne** ($SP_{e_j-e_j}$) to sprzężenia między wymiarami zależnymi tej samej konstrukcji elementu i.

Sprzężenia zewnętrzne i wewnętrzne zapisywane są w formie trójkolumnowych macierzy. Dla sprzężeń zewnętrznych,

$$SP_{e_{j-1}-e_j} \rightarrow [a(k), rel(k), b(k)], \quad (6)$$

gdzie: $j - 1, j$ – oznaczenia współdziałających ze sobą elementów, k – kolejny numer sprzężenia.

Natomiast dla sprzężeń wewnętrznych elementu e_j ,

$$SP_{e_j-e_j} \rightarrow [a(k), rel(k), b(k)]. \quad (7)$$

Oznaczeniom kolumn odpowiadają:

- $a(k)$ – numer wymiaru elementu sprzężonego,
- $rel(k)$ – relacja między wymiarami (przyjęto następujące oznaczenia: 1 - =, 2 - >, 3 - ≥, 4 - <, 5 - ≤, 6 - → (odpowiednio)),
- $b(k)$ – numer wymiaru elementu sprzężonego.

Metody hierarchicznej i iteracyjnej klasyfikacji

W celu rozwiązania powstałej antynomii, przedstawionej w rozdziale wcześniej, opracowano metody agregacji ilościowych cech konstrukcyjnych z zastosowaniem teorii automatycznej klasyfikacji. Podstawowymi metodami automatycznej kla-

syfikacji dostosowanymi do potrzeb klasyfikacji konstrukcji elementów są metody hierarchicznej i iteracyjnej klasyfikacji. Metody **hierarchicznej klasyfikacji** to metody przedstawiające różnorodność cech obiektów (w niniejszej pracy zbiorów konstrukcji elementów $ks_m^{ie_j}$ ($m = 1, iz$)) w postaci dendrogramów. Wyróżniono następujące stadia hierarchicznej klasyfikacji konstrukcji, które algorytmizowano i ujęto w postaci programu GEN 323:

- 1) czytanie macierzy parametrów x_{ia}^u i macierzy danych y_{ij}^e ,
- 2) zapis cech w formie tablic,
- 3) obliczenie zróżnicowania między konstrukcjami z zastosowaniem miary euklidesowej pierwszego rzędu [2, 5],
- 4) wybór konstrukcji o najmniejszym zróżnicowaniu (największym podobieństwie) i obliczenie miar zróżnicowania między nowo utworzoną klasą, a pozostałymi konstrukcjami lub klasami, aż do momentu uzyskania jednej klasy z wszystkimi konstrukcjami,
- 5) wygenerowanie plików do zapisu dendrogramów,
- 6) zapis dendrogramu z zastosowaniem programu *dendro. LSP*.

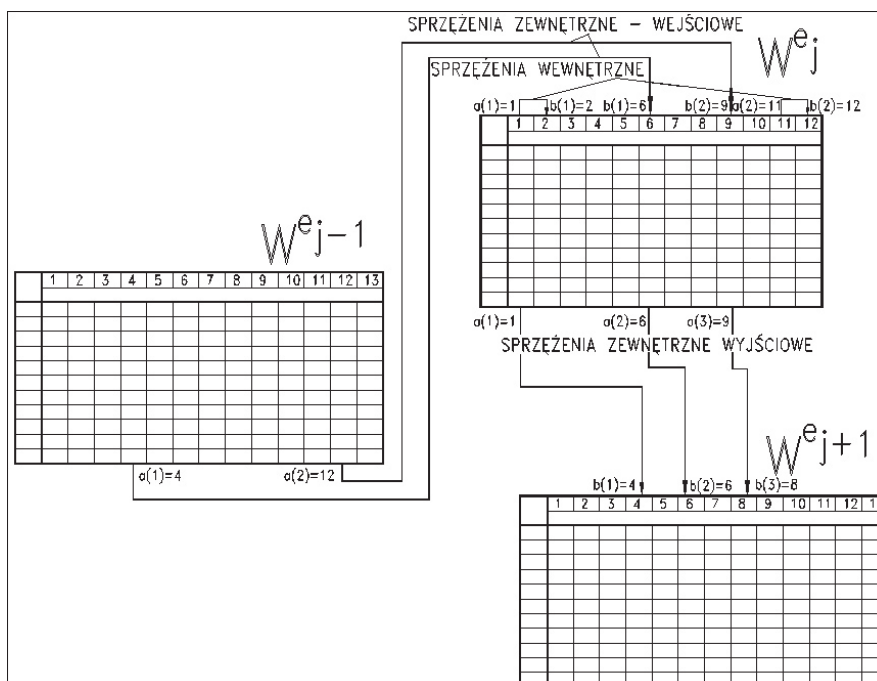
Przykładowy zapis dendrogramu przedstawiono na rysunku 9. Opisuje on graficznie różnorodność ilościowych cech konstrukcyjnych, gdzie na osi odciętych mają miejsce oznaczenia konstrukcji, natomiast na osi rzędnych miara zróżnicowania. Prowadząc linię poziomą np. $U(4)$ uzyskuje się układ klas konstrukcji $\{1,2,3,4\} \{5,6,7\} \{8,9\} \{10,11,12\}$.

W programie GEN 323 generowany jest również zapis układów klas $UH_N^0 \{A_1^0, \dots, A_N^0\}$ dla $N = 2 - (M - 1)$ w formie pliku (RK_kla) (tab. 1).

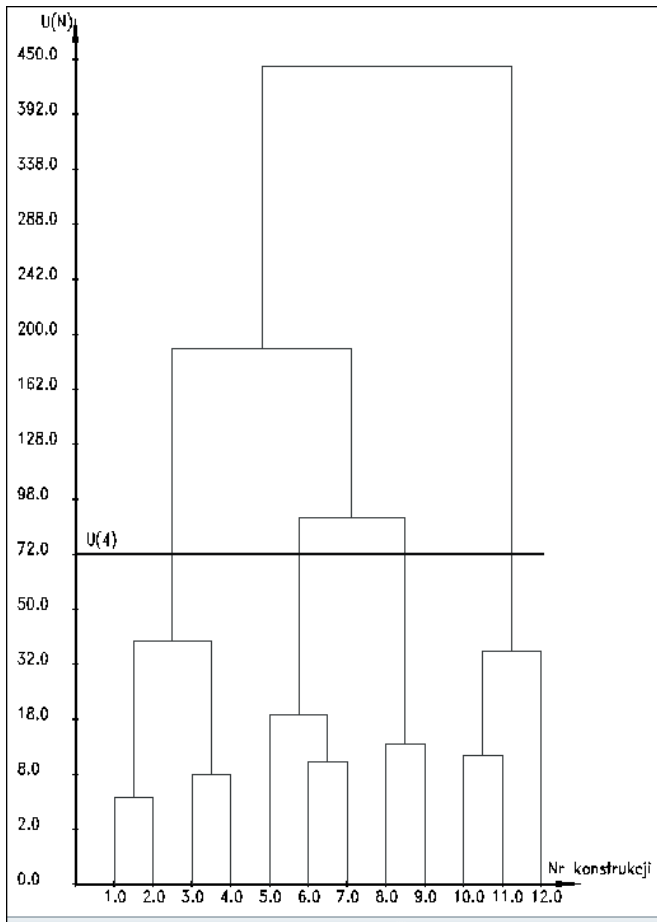
Metoda **iteracyjnej klasyfikacji** korzysta z iteracyjnego udoskonalania wstępnego układu klas U_N^0 o założonej liczbie klas N tak, aby sumaryczne rozproszenie klas było minimalne [2]:

$$H(U_N^0) > H(U_N^1) > H(U_N^2) > \dots H(U_N^z) = H(U_N^*) \quad (8)$$

Pozwala to na takie ujęcie zbioru konstrukcji elementów w układ klas $U_N = \{A_1, \dots, A_i, \dots, A_N\}$, że konstrukcje podobne należały do wspólnej klasy A_i , natomiast klasy A_i, A_j charakteryzują



Rys. 8. Model relacji sprzężeń między wymiarami sprzężonymi współdziałających elementów



Rys. 9. Dendrogram hierarchicznej klasyfikacji

się jak największym stopniem odseparowania, uwzględniając strukturę zmienności cech konstrukcyjnych elementów. Istotny wpływ na wynik klasyfikacji ma wstępny układ klas. Spośród 5

Tab. 1. Zapis układów klas dla $N = 2 - (M - 1)$

Nr konstrukcji	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Układ klas $U(N)$ dla $N=$	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
	3	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	4	1	1	1	1	2	2	2	3	3	4	4
	5	1	1	2	2	3	3	3	4	4	5	5
	6	1	1	2	2	3	3	3	4	4	5	5
	7	1	1	2	2	3	4	4	5	5	6	6
	8	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	7
	9	1	1	2	2	3	4	4	5	6	7	8
	10	1	1	2	2	3	4	5	6	7	8	9
	11	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	12	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

różnych wstępnych układów klas najlepsze wyniki klasyfikacji konstrukcji uzyskano, gdy wstępny układ klas został przejęty z klasyfikacji hierarchicznej. Przedmiotem powyższych rozważań jest **klasyfikacja prosta** przeprowadzana przy zadanej liczbie klas N . W procesie tworzenia uporządkowanych składników rodziny konstrukcji niezbędne jest określenie optymalnego układu klas $U_{NO}^* = \{A_1^*, \dots, A_i^*, \dots, A_{NO}^*\}$ o optymalnej liczbie klas NO . W celu osiągnięcia optymalnego układu klas $U_{NO}^* = \{A_1^*, \dots, A_i^*, \dots, A_{NO}^*\}$, wybranego z zakresu $N = 2 - (m - 1)$, (gdzie: m – liczba klasyfikowanych konstrukcji) podjęte jest drugie stadium klasyfikacji konstrukcji, nazywane **klasyfikacją złożoną**. Wyboru optymalnego układu klas dokonuje się na podstawie miar oceny układów klas: sumarycznej homogenności klas $H(U_N^*)$ i sumarycznego odseparowania w układzie klas $D(U_N^*)$ [2, 6]. Złożoność klasyfikacji wynika z monotoniczności (bez ekstremów) obu miar oceny wraz ze wzrostem liczby klas N . Funkcja wyznaczenia optymalnej liczby klas powinna być tak opracowana, aby pozwalała na wybór tych układów klas, które najlepiej odpowiadają strukturze zmienności cech konstrukcyjnych. Podstawą oceny są zdefiniowane w pracy [4]

Tab. 2. Przyporządkowanie δ dla rodziny konstrukcji chwytaków kleszczowych

i	D	H	Masa	Typowości konstrukcyjne							Typoszeregi KL
	mm	mm	kg	MKP	MKO	MTL	MLP	MCL	MDZ	MKN	
1	25	40	0.2	1	1	1	1	1	1	1	1
2	28	40	0.2	1	1	1	1	1	1	1	1
3	32	63	0.4	2	2	2	2	2	2	2	2
4	35	63	0.5	2	3	2	3	2	2	2	3
5	40	63	0.6	3	4	3	4	3	3	2	4
6	45	63	0.8	3	4	4	4	3	3	3	5
7	50	100	1.5	3	4	4	4	3	3	3	5
8	56	100	1.9	4	5	5	5	4	4	3	6
9	63	100	2.4	4	5	5	5	4	4	3	6
10	71	100	3.1	4	5	5	5	4	4	4	7
11	80	100	3.9	5	6	6	6	5	5	5	8
12	90	120	6	5	6	7	7	5	5	6	9
13	100	120	7.4	5	6	7	7	5	5	6	9
14	112	120	9.3	6	7	8	8	6	6	7	10
15	125	180	17.4	7	8	9	9	7	7	8	11
16	132	180	19.4	8	9	10	10	8	8	9	12
17	140	180	21.8	8	9	10	10	8	8	9	12
18	150	180	25	8	10	10	11	9	9	10	13
19	160	180	28.4	8	10	10	11	9	9	10	13
20	170	200	35.7	8	10	10	11	9	9	11	14
21	180	200	40	8	10	10	11	9	9	11	14
22	190	200	44.5	9	11	11	12	10	10	12	15
23	200	200	54.3	9	11	11	12	10	10	12	15

funkcje celu FC1–FC7. Najlepsze wyniki uzyskano dla funkcji celu FC5 – maksymalnego kąta zgięcia. Dla tak utworzonego układu klas dokonuje się wyboru reprezentantów klas na podstawie maksymalnych wartości parametrów odpowiadających klasie. Metodę algorytmizowano i zestawiono w programie GEN 261.

Podsumowanie

Praktyczne wyniki uporządkowania rodzin konstrukcji: sprzęgieł, siłowników hydraulicznych, chwytaków potwierdziły słuszność stosowania przyporządkowania γ z teorią podobieństwa konstrukcyjnego oraz przyporządkowania δ z zastosowaniem teorii automatycznej klasyfikacji. W tabeli 2 przedstawiono parametry i oznaczenia typowości chwytaka kleszczowego, których wymiary dobrano na podstawie teorii podobieństwa konstrukcyjnego, a następnie poddano agregacji dla wszystkich elementów składowych.

Wynikiem przyporządkowania γ i δ jest utworzenie 15 typowości chwytaków kleszczowych dla 23 wektorów potrzeb. Poszczególne konstrukcje typowości tworzone są za pomocą 75 typowości elementów. Jeżeli przeprowadzono tylko przyporządkowanie γ (bez przyporządkowania δ), to uzyskano 161 konstrukcji elementów o znacznym zróżnicowaniu cech konstrukcyjnych. Stopień redukcji liczby elementów można wyznaczyć z zależności:

$$R^{el} = \frac{iz \cdot jz}{\sum_{j=1, jz} mz_j} \quad (9)$$

Dla rozważanej rodziny konstrukcji $R^{el} = 2,15$, co znaczy, że dwukrotnie została zmniejszona liczba konstrukcji elementów. Tak utworzone uporządkowane rodziny konstrukcji pozwalają zwiększyć seryjność wytwarzania oraz zmniejszyć koszty wytwarzania.

Literatura

- [1] Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K. H.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung*. Springer-Verlag GmbH. 2006
- [2] Gendarz P.: *Elastyczne systemy modułowe konstrukcji maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2009
- [3] Gendarz P.: *Tworzenie typoszeregów środków technicznych z zastosowaniem teorii podobieństwa konstrukcyjnego*. Systems. Journal of Transdisciplinary Systems Science. Volume 16, ISSUE NUMBER I, 2012 (ISSN 1427-275X), s. 187-198
- [4] Gendarz P.: *Praktyczna weryfikacja teorii podobieństwa konstrukcyjnego*. Journal of Transdisciplinary Systems Science. Volume 16, ISSUE NUMBER I, 2012 (ISSN 1427-275X), s. 175-196
- [5] Gendarz P.: *Parametryczny zapis uporządkowanych rodzinach konstrukcji maszyn*. Monografia WPS, Gliwice 2012
- [6] Gendarz P.: *Bildung von geordneten Konstruktionsfamilien unter Anwendung von Ähnlichkeitsgesetzen*. FORSCHUNG IM INGENIEURWESEN – ENGINEERING RESEARCH. Band 77, Heft 3 (2013), Seite 105-115, Springer 2013