

# ANALIZA WYNIKÓW OPTYMALIZACJI INNOWACYJNEJ POMPY ZĘBATEJ W KONTEKŚCIE WAŻNOŚCI ZASTOSOWANYCH KRYTERIÓW OCENY

Anna M. DEPTUŁA, Adam DEPTUŁA

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono analizę wyników optymalizacji poli-ewolwentowego zarysu pompy zębatej przeprowadzonej za pomocą drzew decyzyjnych. Od ponad 400 lat konstrukcje pomp podlegały licznym modyfikacjom. Nadal jednak nie opracowano takiego zarysu, który pozwalałby na uzyskanie najniższej z możliwych pulsacji wydajności. Dlatego też, rozważania w zakresie analizy poszczególnych wariantów konstrukcyjnych powinny być nadal kontynuowane. Celowe w tym zakresie okazuje się wyznaczenie istotności poszczególnych kryteriów optymalizacyjnych. Bezpośrednie uwzględnienie w optymalizacji opinii zespołu ekspertów, na etapie wyznaczania alternatyw, może prowadzić do nieco innych rozwiązań aniżeli zastosowanie algorytmu Quine'a - Mc Cluskeya minimalizacji indywidualnych cząstkowych funkcji logicznych

**Słowa kluczowe:** kryteria optymalizacji, pompa zębata, zarys poli-ewolwentowy, optymalizacja, drzewa decyzyjne, innowacja

## 1. Wstęp

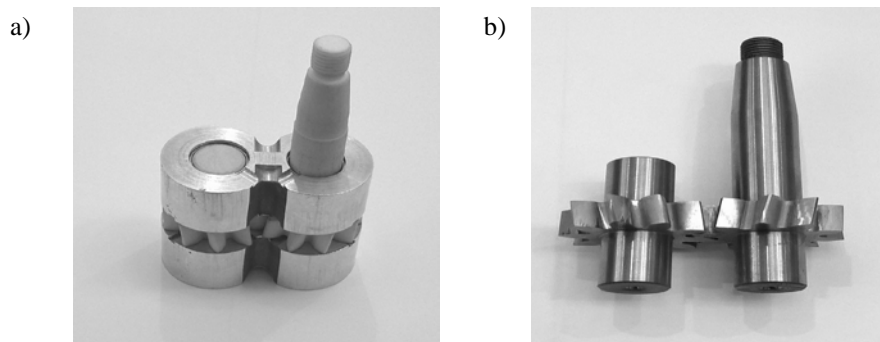
Alternatywne konstrukcje pomp zębatych są rozwijane od ponad 400 lat. Twórcą pierwszej jednostki zębatej był Johannes Kepler, który opatentował swoje rozwiązanie w 1604r. Pierwotnym zastosowaniem pompy było przepompowywanie wody w odwadnianych kopalniach [1, 2, 3]. Bezzaworowa i samozasysająca konstrukcja zębata, odporna na liczne zanieczyszczenia występujące w usuwanej wodzie ze studzienek szybowych, bardzo szybko wyparła stosowane wówczas i kłopotliwe w obsłudze pompy tłokowe. Autor rozwiązania widział szersze zastosowanie swojego wynalazku. Wówczas, wydawać by się mogło, że jednostki zębate osiągnęły już swój techniczny szczyt, a opracowane konstrukcje z kołami nacinanymi obwiedniowo, zapewniają najniższą z możliwych pulsacji wydajności. Przedstawione m. in. w pracach: [4, 5, 6] rozważania teoretyczne i wyniki pomiarów opracowanych dla jednostek modelowych i prototypowych zaprzeczają tezie kresu technicznych możliwości pomp z kołami nacinanymi obwiedniowo. Opracowana koncepcja pompy o zarysie poli-ewolwentowym wytycza nowe kierunki rozwoju, a co za tym idzie i zastosowań jednostek zębatych. Innowacyjne rozwiązanie z zarysem trójewolwentowym stanowi przełom konstrukcyjny i jest jedynym tego typu rozwiązaniem na świecie. Jego ostateczna konstrukcja wymagała przeprowadzenia licznych badań, mających na celu opracowanie alternatywnych zarysów prototypu. W tym zakresie wykonano obliczenia związane z zastosowaniem drzew rozgrywających parametrycznie i współczynnika złożoności tych struktur [7]. Celem artykułu jest przedstawienie uzyskanych wyników oraz ich analiza w kontekście możliwości opracowania innych alternatyw być może lepiej spełniających przyjęte kryteria optymalizacyjne.

Obiektem badań prezentowanym w artykule były konstrukcje pomp modelowych i prototypowych, których zarys zęba został zoptymalizowany z zastosowaniem wielowartościowych drzew logicznych [8]. Proces optymalizacyjny przeprowadzono z uwzględnieniem pięciu bazowych kryteriów: technologiczności narzędzia, uzyskania minimalnego współczynnika kompresji, występowania małych zmian sił dynamicznych w ząbieniu, uzyskania minimalnego współczynnika pulsacji wydajności oraz zapewnienia wysokiej efektywności energetycznej. Dobór wykorzystywanych w optymalizacji kryteriów miał charakter celowy, co również zostało szerzej omówione w niniejszej pracy.

W rozdziale drugim dokonano prezentacji obiektu badań oraz przeprowadzonych pomiarów. W rozdziale trzecim zaprezentowano charakterystykę kryteriów optymalizacyjnych. W czwartej części artykułu zaprezentowano wyniki optymalizacji trójewolwentowego zarysu zęba, których analizę opisano w rozdziale piątym. Całość podsumowano w szóstej części pracy, wskazując na alternatywne konstrukcje innowacyjnej pompy zębatej.

## 2. Charakterystyka obiektu badań

Obiektem badań były konstrukcje pomp modelowych i prototypowych, których zarys zęba został zoptymalizowany z zastosowaniem wielowartościowych drzew logicznych. W oparciu o przeprowadzone obliczenia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej oraz możliwości technologiczne Hydrotor S.A. (podmiotu wdrażającego konstrukcję) zaprojektowano cały typoszereg pomp zębatych o zarysie trójewolwentowym. Przykładowy zarys uzębienia dla kół zębatych przedstawiono na rysunku 1a. Następnie przystąpiono do opracowania technologii wykonania nowych zarysów. Przed wykonaniem kół sprawdzono kinematykę zoptymalizowanego ząbienia trójewolwentowego na kołach wydrukowanych w technologii 3D. Przedstawione na rysunku 1b koła modelowe były odpowiednikiem kół o wydajności jednostkowej  $q=8\text{cm}^3/\text{obr}$  [8].



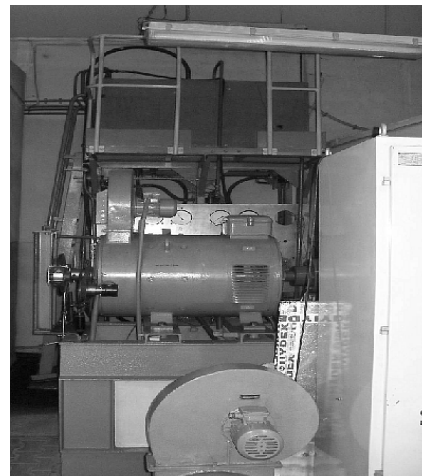
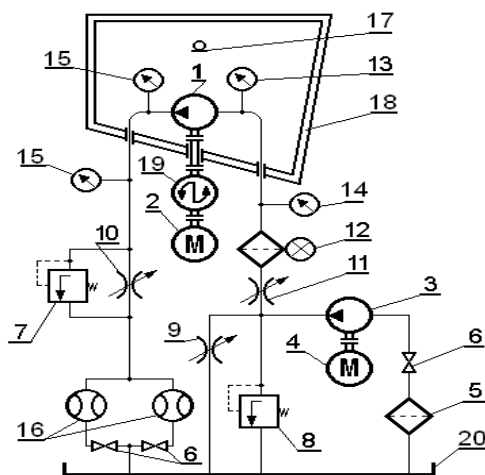
Rys. 1. a) Koła trójewolwentowe wykonane w technologii druku 3D, b) Koła zębate szlifowane

Po pozytywnej weryfikacji kół wydrukowanych w polietylenie przystąpiono do ich wykonywania w warunkach przemysłowych. Przeprowadzona analiza tolerancji wymiarowych oraz kształtu w efekcie końcowym pozwoliła na wyselekcjonowanie wymiarów kontrolnych: krytycznych, ważnych i mało ważnych. Zaowocowało to

racjonalnym zawężeniem tolerancji wymiarów i kształtu tam gdzie to jest niezbędne oraz obniżeniem klasy dokładności [8].

Badania przeprowadzono po uruchomieniu próbnym stanowiska tzn. sprawdzono działanie pompy, zaworu bezpieczeństwa oraz wskazania wszystkich przyrządów pomiarowych. Pomiar rozpoczęto od nastawienia określonych prędkości obrotowych wałka,  $n = 500, 800, 1000, 1500$  i  $2000$  obr/min. Obciążenie pompy realizowano dla ciśnienia tłoczenia  $p_t = 0; 2; 4; 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 22; 24; 28, 30$  oraz  $32$  MPa [9].

Analizowane charakterystyki statyczne wyznaczono na stanowisku badawczym przedstawionym na rysunku 2. W układzie tym badana pompa 1 napędzana jest silnikiem 2 prądu stałego o mocy  $100$  kW współpracującego z terystorowym układem sterującym. Silnik prądu stałego oraz terystorowy układ sterujący typu DSI-0360/MN-503 umożliwiają płynną zmianę prędkości obrotowej pompy w zakresie od  $0$  do  $2000$  obr/min. Pompa wstępnego ciśnienia 3 oraz pompa badana 1 są zabezpieczone zaworami bezpieczeństwa 7 i 8. Obciążenie badanej pompy 1 realizuje się za pomocą zaworu dławiącego 10. Wydajność rzeczywista  $Q_{rz}$  pompy mierzona jest za pomocą przepływomierza turbinkowego 16 typu HO3/4x5/8 firmy Hoffer o zakresie pomiarowym  $0-100$  dm<sup>3</sup>/min. Rejestrację chwilowych natężeń przepływu przeprowadzono na uniwersalnym liczniku MINItrol typ E S730 DRT firmy KEP. Moment  $M$  oraz liczba obrotów  $n$  na wale pompy mierzona jest za pomocą zintegrowanego czujnika momentu i prędkości obrotowej 19 typ Mt1000 o zakresie pomiarowym od  $0$  do  $1000$  N<sub>m</sub> oraz układu rejestrującego typu Beta 2000. Zestaw ten służy również do ustalenia zadanej prędkości silnika napędowego. Temperaturę  $t$  cieczy w zbiorniku mierzono zestawem termistorów, czujnik typu PU 391/2 miernik typu PU 381/1 [10].



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego: 1- badana pompa zębata, 2- silnik napędowy prądu stałego, 3- pompa zasilająca, 4- silnik prądu zmiennego, 5- filtr ssawny, 6- zawór odcinający, 7, 8- zawór bezpieczeństwa, 9, 10, 11- zawory odcinające, 12- filtr zlewowy FD1-10-200-10 z zaworem przelewowym i sygnalizacją wizualną elektryczną ( $10\mu\text{m}$ ), 13, 14- manowakuo-metr, 15- manometr, 16- przepływomierz, 17- mikrofon pomiarowy, 18- komora akustyczna, 19- momentomierz, 20- zbiornik

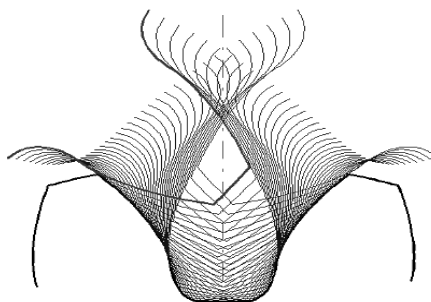
### 3. Charakterystyka kryteriów optymalizacyjnych

O wyborze kryteriów zdecydował główny cel konstruowanych pomp, a więc poprawa wybranych parametrów hydraulicznych i akustycznych. Nie uzyskanie założonego efektu równoznaczne było z nieudaniem technologicznie produktem.

Proces optymalizacyjny został przeprowadzony z uwzględnieniem pięciu bazowych kryteriów:

1. Technologiczności narzędzia.
2. Uzyskania minimalnego współczynnika kompresji.
3. Występowania małych zmian sił dynamicznych w zazębieniu.
4. Uzyskania minimalnego współczynnika pulsacji wydajności.
5. Zapewnienia wysokiej efektywności energetycznej.

Technologiczność narzędzia ma znaczenie w kontekście uzyskania dokładności zarysów ewolwentowych podczas nacinania zębów prostymi narzędziami. Z tego względu metoda obwiedniowa jest podstawowym sposobem obróbki skrawaniem kół zębatych. Metoda obwiedniowa wykorzystuje geometryczny proces powstawania ewolwenty (rys. 3).



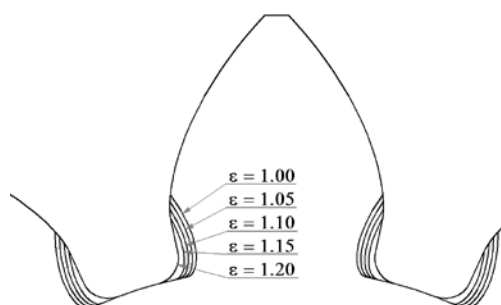
Rys. 3. Metoda obwiedniowa nacinania zębów - przebieg położenia obwiedniowych krawędzi skrawającej [10]

Niestety nie ma możliwości wykonania tą metodą wszystkich zarysów poli-ewolwentowych zęba. Istnieje również konieczność wykonywania narzędzia oddzielnie dla każdego rodzaju uzębienia różniącego się przesunięciem zarysu (korekcją).

Możliwość uzyskania minimalnego współczynnika kompresji w przestrzeni zasklepionej związana jest z przejściem kół zębatych z położenia drugiego do ostatniego. Temu procesowi towarzyszy zmniejszenie się objętości zasklepianej przestrzeni. Zasklepianie cieczy we wrębach współpracujących kół zębatych występuje w pompach o zazębieniu zewnętrznym, gdy liczba przyporu jest większa od jedności  $e > 1$ . Ewolwentowy zarys dolny w głównej mierze wpływa na objętość przestrzeni zasklepionej i z punktu widzenia współczynnika kompresji należy dążyć do uzyskania możliwie najmniejszej różnicy pomiędzy objętością  $V_{max}$  i  $V_{min}$ . Modyfikację przeprowadza się w rejonie wierzchołka lub stopy zęba. Główną zaletą takich rozwiązań jest zachowanie jednakowych średnic kół i wytoczeń w korpusie pompy. Wykonanie ścięcia na kole czynnym ułatwia przepływ oleju z przestrzeni zasklepionej do komory ssawnej [10].

W literaturze [11] wykazano wpływ modyfikacji zarysu ewolwenty na właściwości dynamicznej pompy zębatej. Możliwość uzyskania małych zmian siły dynamicznej w zazębieniu (wpływ na hałas i drgania) ma w tym względzie istotne znaczenie. Przebieg zmiany sztywności w zazębieniu określono bazując na metodzie obliczeń przedstawionej w

pracy [10]. W pracy przedstawiono także obliczenia sztywności zazębienia, które w dalszym etapie posłużyły do określenia sztywności sześciu kół zębatych bez modyfikacji  $e=1,20$  oraz z różnym stopniem podcięcia stopy zęba, tj. dla  $e = 1.15, 1.10, 1.05, 1.01$  oraz  $1.00$ . (rys. 4).



Rys. 4. Zarys stopy zęba dla różnych stopni podcięcia dla  $z=10, m_0=4, \alpha_0=20^\circ, y=1.17, x=0.5, b=26$  [10]

Z przeprowadzonych symulacji wynika, że podcięcie stopy zęba wpływa w głównej mierze na obniżenie sztywności maksymalnej. Optymalizowany zarys poli-ewolwentowy powinien zapewniać małe zmiany siły dynamicznej w zazębieniu. Siły dynamiczne płynnie się zmieniają w przypadku zębów skośnych.

Współczynnik pulsacji wydajności definiowany jest jako stosunek różnicy wydajności maksymalnej i minimalnej do wydajności średniej (teoretycznej). Ogólnie rzecz ujmując, pulsacja ciśnienia jest przyczyną [10]:

- 1) nieprawidłowej pracy elementów sterujących,
- 2) nierównomiernego ruchu odbiornika,
- 3) ogranicza uzyskanie prawidłowej dokładności pozycjonowania odbiornika,
- 4) oraz powoduje wzmoczoną hałaśliwość pracy maszyn i urządzeń z napędem hydrostatycznym.

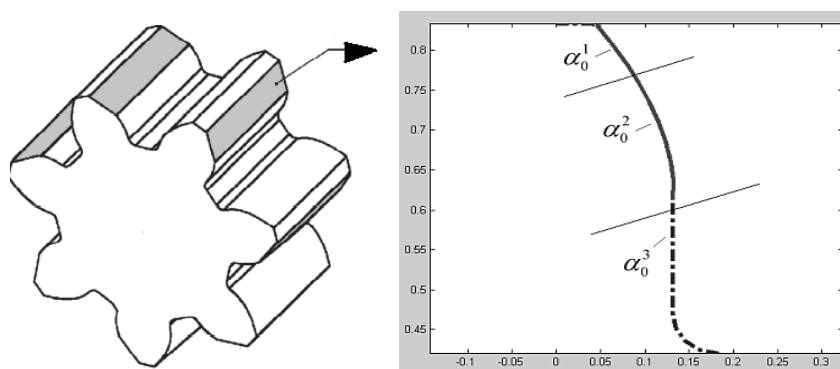
Skutki wysokiej pulsacji ciśnienia pomp zębatych opisano m.in. w pracach [5, 6, 9, 10, 11]. Efektywność energetyczna wyrażona współczynnikiem masy do mocy jest ważnym elementem w rozwoju konstrukcji pomp zębatych. Przedstawione w literaturze wyniki badań jednostek prototypowych wskazują na możliwość podniesienia sprawności do wartości znacznie przewyższających poziom 90%. Warunkiem otrzymania tak dużej efektywności energetycznej jest zapewnienie optymalnej szczeliny obwodowej, która umożliwi stałą wartość luzu na całym obwodzie kół zębatych współpracujących z korpusem pompy niezależnie od ciśnienia i temperatury pracy przy jednoczesnym utrzymaniu na powierzchni obwodowej kół niezbędnej grubości filmu smarującego. Zwiększenie efektywności energetycznej jednostek prototypowych wynika w głównej mierze z zapewnienia wysokiej szczelności wewnętrznej [10, 11].

#### 4. Wyniki optymalizacji trójewolwentowego zarysu zęba

Optymalizacja trójewolwentowego zarysu zęba przeprowadzona została za pomocą algorytmu Quine'a - Mc Cluskeya minimalizacji indywidualnych cząstkowych wielowartościowych funkcji logicznych [12]. Metoda pozwala na wyznaczenie rangi ważności kolejnych zmiennych decyzyjnych poprzez zamienianie piętér w logicznych

drzewach decyzyjnych. Szczegóły optymalizacji przedstawiono w pracy [12]. Elementem optymalizowanym był zarys poli-ewolwentowy zęba zbudowanego z dwóch ewolwent zwyczajnych i jednej ewolwenty wydłużonej lub trzech ewolwent zwyczajnych (rys. 5). W procesie optymalizacji metodę wykorzystano dwukrotnie:

1. Do wyboru propozycji zarysów poli-ewolwentowych.
2. Do określania najlepszego wariantu konstrukcyjnego pompy przy założonych zarysach poli-ewolwentowych.



Rys. 5. Zarys poli-ewolwentowy zęba składający się z trzech ewolwent  $\alpha_0^1$ ,  $\alpha_0^2$ ,  $\alpha_0^3$

Na etapie pierwszym, w celu przeprowadzenia weryfikacji wartości kątów przyporu każdej z ewolwent, przyjęto dopuszczalne wartości parametrów  $\alpha_0^1$ ,  $\alpha_0^2$ ,  $\alpha_0^3$ , które zakodowano następująco:

- $\alpha_0^1$  - czterowartościowo: 0- 16°, 1- 18°, 2- 22°, 3- 26°;
- $\alpha_0^2$  - trójwartościowo: 0- 16°, 1- 20°, 2- 26°;
- $\alpha_0^3$  - czterowartościowo: 0- 16°, 1- 18°, 2- 22°, 3- 26°.

Po zastosowaniu algorytmu Quine'a- Mc Cluskey otrzymano  $4 \cdot 3 \cdot 4 = 48$  kombinacji zmian wartości kątów przyporu dla  $\alpha_0^1$ ,  $\alpha_0^2$  i  $\alpha_0^3$ . Następnie biorąc pod uwagę przyjęte kryteria oraz podstawowe właściwości pompy zębatej ostatecznie utworzono pięć koncepcji zarysów poli-ewolwentowych zęba. Dla pięciu propozycji zarysów poli-ewolwentowych przyjęto następujące charakterystyki:

- **A:** 1. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^1 > \alpha_0^2$  | 2. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^2 = 20^\circ$  | 3. Ewolwenta wydłużona.
- **B:** 1. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^1 < \alpha_0^2$  | 2. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^2 = 20^\circ$  | 3. Ewolwenta wydłużona.
- **C:** 1. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^1 > \alpha_0^2$  | 2. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^2 = 20^\circ$  | 3. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^3 < \alpha_0^2$  |.
- **D:** 1. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^1 < \alpha_0^2$  | 2. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^2 = 20^\circ$  | 3. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^3 > \alpha_0^2$ .
- **E:** 1. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^1 < \alpha_0^2$  | 2. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^2 = 20^\circ$  | 3. Ewolwenta zwyczajna:  $\alpha_0^3 < \alpha_0^2$ .

Opracowano również 20 możliwych do wykonania rozwiązań (Kanoniczna Alternatywna Postać Normalna) wraz z ich ocenami punktowymi wyrażającymi stopień spełnienia przyjętych kryteriów ( $k_i$ ) (tabela 1), przy czym ocena 3 oznaczała największy

możliwy stopień spełnienia przyjętych kryteriów, a 1 minimalny. Zatem,  $k_i$  określa w jakim stopniu dane zarysy poli-ewolwentowe: A, B, C, D i E spełniają przyjęte kryteria:  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ .

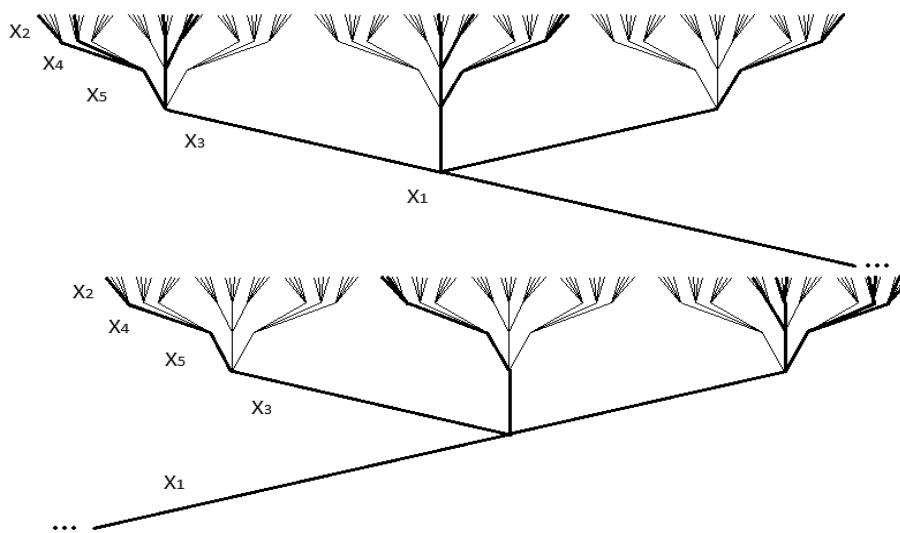
Tab.1. KAPN kombinacji zmian kodowych dla  $\alpha_0^1, \alpha_0^2, \alpha_0^3$

$k_i$	$\alpha_0^1$	$\alpha_0^2$	$\alpha_0^3$	$k_i$	$\alpha_0^1$	$\alpha_0^2$	$\alpha_0^3$
<b>3</b>	2	2	2	<b>3</b>	0	2	2
<b>2</b>	2	2	1	<b>3</b>	0	2	3
<b>1</b>	1	1	2	<b>2</b>	0	1	1
<b>2</b>	1	2	2	<b>3</b>	0	2	1
<b>1</b>	1	1	1	<b>2</b>	0	1	0
<b>2</b>	1	2	1	<b>3</b>	0	2	0
<b>2</b>	1	2	3	<b>1</b>	3	2	2
<b>2</b>	2	2	0	<b>1</b>	3	2	1
<b>3</b>	1	2	0	<b>1</b>	0	1	3
<b>2</b>	0	1	2	<b>1</b>	0	0	1

$k_i$  - punktowa ocena dla zmian kodowych wartości kątów przyporu  $\alpha_0^1, \alpha_0^2, \alpha_0^3$

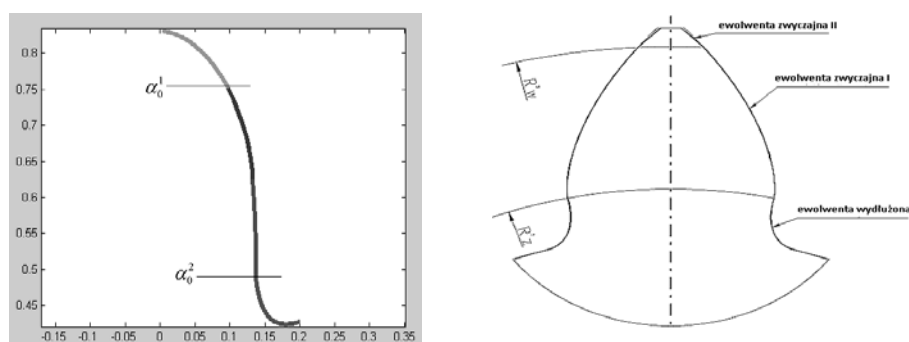
W konsekwencji, optymalnym drzewem okazało się wielowartościowe drzewo logiczne o układzie pięter -  $\alpha_0^2, \alpha_0^1, \alpha_0^3$ . Biorąc pod uwagę doświadczenia przedsiębiorcy oraz możliwości wytwórcze narzędzi skrawających przyjęto do dalszej analizy kąt  $\alpha_0^2 = 20^\circ$  dla głównej (wiodącej ewolwenty) [8].

Następnie, po ponownym zastosowaniu algorytmu Quine'a- Mc Cluskey otrzymano  $n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 5 = 120$  wielowartościowych drzew logicznych określających przy danych kryteriach ostateczny wariant konstrukcyjny. Na rysunku 6 przedstawiono optymalne wielowartościowe drzewo logiczne dla analizowanego przykładu.



Rys. 6. Optymalne wielowartościowe drzewo logiczne

Po analizie uzyskanych wyników okazało się, iż najważniejszym parametrem występującym w korzeniach drzew o najmniejszej liczbie gałęzi prawdziwych jest  $X_1$ . Zatem, z punktu widzenia przyjętych kryteriów i przeprowadzonej analizy optymalnym zarysem jest zarys przedstawiony na rysunku 7 [8].



Rys.7. Schemat poglądowy i rysunek konstrukcyjny zarysu trójewolwentowego typu  $X_1$

Należy zaznaczyć, że identyczne wyniki (jeszcze nie opublikowane) uzyskano z zastosowaniem współczynnika złożoności dla drzew rozgrywających parametrycznie [13].

## 5. Analiza wyników optymalizacji w kontekście przyjętych kryteriów

W procesie optymalizacji zarysu trójewolwentowego zęba - innowacyjnej pompy zębatej wykorzystano zestaw pięciu kryteriów. Kryteria te, dobrane zostały przez zespół ekspertów. Następnie, zgodnie z założeniami metody Quine'a- Mc Cluskey tzw. ekspert wiodący [14] określił zakodowane wartości logiczne. W ten sposób przeprowadzono optymalizację zgodnie z założeniami przywołanego algorytmu. W wyniku analizy 120 drzew można wykazać optymalną kombinację określoną jako zestaw:  $X_1, X_3, X_5, X_4, X_2$ , (drzewo nr 9) przy liczbie gałązek prawdziwych równej 51. Wskazuje ona na konkretną ważność przyjętych kryteriów. Zastosowana metoda optymalizacji uwzględnia opinię jedynie eksperta wiodącego. Dlatego poproszono pozostałych członków zespołu o określenie ważności poszczególnych kryteriów. W określaniu ich ważności wykorzystano metodę porównania parami [14]. Eksperti w pierwszym etapie przypisywali istotność do danego kryterium wykorzystując skalę: najbardziej ważne -7, bardzo ważne - 6, nieco bardziej ważne - 5, ważne - 4, nieco mniej ważne 3, mało ważne - 2, najmniej ważne - 1. Następnie, poprzez zamianę uzyskanych ocen, zgodnie z procedurą zawartą w pracach [15, 16] otrzymano ważności kryteriów, zapisane w macierzach przedstawionych na rysunku 8. Zastosowana metoda ustalania wag, pozwala na zachowanie względności w ustalaniu ważności poszczególnych kryteriów, poprzez porównywanie ich parami. Taka zasada zalecana jest podczas oceny innowacyjnych rozwiązań. Dodatkowo, zespół ekspertów (siedmioosobowy) jest również typowy dla sytuacji związanej z oceną nowatorskich rozwiązań nie tylko w zakresie optymalności ale również szacowania ryzyka (patrz więcej [17]).



Nr kryterium	EKSPERT 1					W <sub>j</sub>	norm W <sub>j</sub>
	1	2	3	4	5		
1		0,42	0,33	0,42	0,50	1,67	0,17
2	0,58		0,42	0,50	0,58	2,08	0,21
3	0,67	0,58		0,58	0,67	2,50	0,25
4	0,58	0,50	0,42		0,58	2,08	0,21
5	0,50	0,42	0,33	0,42		1,67	0,17

Nr kryterium	EKSPERT 2					W <sub>j</sub>	norm W <sub>j</sub>
	1	2	3	4	5		
1		0,50	0,58	0,50	0,42	2,00	0,20
2	0,50		0,58	0,50	0,42	2,00	0,20
3	0,42	0,42		0,42	0,33	1,58	0,16
4	0,50	0,50	0,58		0,42	2,00	0,20
5	0,58	0,58	0,67	0,58		2,42	0,24

Nr kryterium	EKSPERT 3					W <sub>j</sub>	norm W <sub>j</sub>
	1	2	3	4	5		
1		0,33	0,58	0,50	0,33	1,75	0,18
2	0,67		0,75	0,66	0,5	2,58	0,26
3	0,42	0,25		0,41	0,25	1,33	0,13
4	0,50	0,33	0,58		0,33	1,75	0,18
5	0,67	0,50	0,75	0,67		2,58	0,26

Nr kryterium	EKSPERT 4					W <sub>j</sub>	norm W <sub>j</sub>
	1	2	3	4	5		
1		0,42	0,50	0,33	0,42	1,67	0,17
2	0,58		0,58	0,42	0,50	2,08	0,21
3	0,50	0,42		0,33	0,42	1,67	0,17
4	0,67	0,58	0,67		0,58	2,50	0,25
5	0,58	0,50	0,58	0,42		2,08	0,21

Nr kryterium	EKSPERT 5					W <sub>j</sub>	norm W <sub>j</sub>
	1	2	3	4	5		
1		0,50	0,42	0,58	0,58	2,08	0,21
2	0,50		0,41	0,58	0,58	2,08	0,21
3	0,58	0,58		0,67	0,67	2,50	0,25
4	0,42	0,42	0,33		0,50	1,67	0,17
5	0,42	0,42	0,33	0,50		1,67	0,17

Nr kryterium	EKSPERT 6					W <sub>j</sub>	norm W <sub>j</sub>
	1	2	3	4	5		
1		0,58	0,42	0,50	0,50	2,00	0,20
2	0,42		0,33	0,417	0,42	1,58	0,16
3	0,58	0,67		0,583	0,58	2,42	0,24
4	0,50	0,58	0,42		0,50	2,00	0,20
5	0,50	0,58	0,42	0,50		2,00	0,20

W<sub>j</sub> - wartość wagi

normW<sub>j</sub> - znormalizowana wartość wagi

Rys. 8. Wagi ustalone przez poszczególnych ekspertów dla przyjętych kryteriów optymalizacyjnych

Na tej podstawie ustalono ważności kryteriów dla ekspertów 1-6. Analiza uzyskanych wag pozwala na ustalenie następującej hierarchii:

1. Dla eksperta 1: X<sub>3</sub>; X<sub>2</sub> i X<sub>4</sub>; X<sub>1</sub> i X<sub>5</sub>.
2. Dla eksperta 2: X<sub>5</sub>; X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> i X<sub>4</sub>; X<sub>3</sub>.
3. Dla eksperta 3: X<sub>2</sub> i X<sub>5</sub>; X<sub>1</sub> i X<sub>4</sub>; X<sub>3</sub>.
4. Dla eksperta 4: X<sub>4</sub>; X<sub>2</sub> i X<sub>5</sub>; X<sub>1</sub> i X<sub>3</sub>.
5. Dla eksperta 5: X<sub>3</sub>; X<sub>1</sub> i X<sub>2</sub>; X<sub>4</sub> i X<sub>5</sub>.
6. Dla eksperta 6: X<sub>3</sub>; X<sub>1</sub>, X<sub>4</sub> i X<sub>5</sub>; X<sub>2</sub>.

Następnie, z 120 kombinacji, uzyskanych z optymalizacji metodą Quine'a Mc Cluskey'a, wybrano te, które pokrywają się z hierarchią wag pozostałych ekspertów. Dzięki temu na wyniki, uzależnione od opinii eksperta wiodącego, nałożono ważność ustaloną przez wszystkich członków zespołu, co szczegółowo przedstawiono w tabeli 2.

Z uwagi na brak możliwości uzyskania w zastosowanej metodzie optymalizacji równoważnych kryteriów obliczono średnią wagę dla sześciu ekspertów i utworzono w ten sposób siódmą hierarchię kryteriów (X<sub>5</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>3</sub>) (można powiedzieć, że pełni ona rolę „sztucznego eksperta”), która rozstrzygała o kolejności poszczególnych kryteriów w równoważnych sytuacjach. Przykładowo, dla eksperta 1 (E1) znaleziono 4 równoważne kombinacje (z punktu widzenia wag ustalonych metodą porównania parami) (tab. 2).

Tab. 2. Porównanie wyników uzyskanych z zastosowania algorytmu Quine'a Mc Cluskey'a oraz analizy hierarchii wag ustalonych metodą porównania parami

Lp.	Nr wielowartościowego drzewa logicznego z danym układem piętrowym	Metoda porównania parami - hierarchia wag właściwa dla:
1	Nr 52/ X <sub>3</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>1</sub> / <b>61</b>	<b>eksperta 1:</b> X <sub>3</sub> ; X <sub>2</sub> i X <sub>4</sub> ; X <sub>1</sub> i X <sub>5</sub> .
2	Nr 54/ X <sub>3</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>5</sub> / <b>64</b>	
3	Nr 67/ X <sub>3</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>1</sub> / <b>63</b>	
4	Nr 68/ X <sub>3</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>5</sub> / <b>66</b>	
5	Nr 98/ X <sub>5</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>3</sub> / <b>59</b>	<b>eksperta 2:</b> X <sub>5</sub> ; X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> i X <sub>4</sub> ; X <sub>3</sub> .
6	Nr 100/ X <sub>5</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> / <b>61</b>	
7	Nr 115/ X <sub>5</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> / <b>60</b>	
8	Nr 117/ X <sub>5</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> / <b>64</b>	
9	Nr 107/ X <sub>5</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> / <b>65</b>	<b>eksperta 3:</b> X <sub>2</sub> i X <sub>5</sub> ; X <sub>1</sub> i X <sub>4</sub> ; X <sub>3</sub>
10	Nr 108/ X <sub>5</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>3</sub> / <b>59</b>	
11	Nr 38/ X <sub>2</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>3</sub> / <b>62</b>	
12	Nr 40/ X <sub>2</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> / <b>62</b>	
13	Nr 75/ X <sub>4</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> / <b>60</b>	<b>eksperta 4:</b> X <sub>4</sub> ; X <sub>2</sub> i X <sub>5</sub> ; X <sub>1</sub> i X <sub>3</sub> .
14	Nr 77/ X <sub>4</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> , X <sub>1</sub> / <b>58</b>	
15	Nr 87/ X <sub>4</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>3</sub> , X <sub>1</sub> / <b>59</b>	
16	Nr 89/ X <sub>4</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>3</sub> / <b>61</b>	
17	Nr 62/ X <sub>3</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>4</sub> / <b>61</b>	<b>eksperta 5:</b> X <sub>3</sub> ; X <sub>1</sub> i X <sub>2</sub> ; X <sub>4</sub> i X <sub>5</sub> .
18	Nr 70/ X <sub>3</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>5</sub> / <b>65</b>	
19	Nr 72/ X <sub>3</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>4</sub> / <b>66</b>	
20	Nr 65/ X <sub>3</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>2</sub> / <b>54</b>	
21	Nr 66/ X <sub>3</sub> , X <sub>1</sub> , X <sub>5</sub> , X <sub>4</sub> , X <sub>2</sub> / <b>52</b>	<b>eksperta 6:</b> X <sub>3</sub> ; X <sub>1</sub> , X <sub>4</sub> i X <sub>5</sub> ; X <sub>2</sub> .

Następnie, określono najlepszą kombinację, ustalając w sytuacjach równoważnych, czyli X<sub>2</sub> i X<sub>4</sub> oraz X<sub>1</sub> i X<sub>5</sub> odpowiednią hierarchię zgodną z wagami tzw. „sztucznego eksperta”. Dla E1 ostatecznie określono kolejność: X<sub>3</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>5</sub> odpowiadająca drzewu nr 68. Dla E2 kolejność X<sub>5</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>3</sub> odpowiadająca drzewu nr 59, dla E3 kolejność X<sub>5</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>3</sub> odpowiadająca drzewu nr 107 (jest to jednocześnie kolejność „sztucznego eksperta”), E4 kolejność X<sub>4</sub>, X<sub>5</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>3</sub> odpowiadająca drzewu nr 75, E5 kolejność X<sub>3</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>5</sub>, X<sub>4</sub> odpowiadająca drzewu nr 72 oraz dla E6 kolejność X<sub>3</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>5</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>2</sub> odpowiadająca drzewu nr 66. W ten sposób analiza wag ustalonych przez poszczególnych ekspertów pozwoliła na wyznaczenie optymalnych rozwiązań wg ich opinii. Należy podkreślić, iż żadne z wyznaczonych rozwiązań nie było rozwiązaniem optymalnym wyznaczonym poprzez zastosowanie algorytmu Quine'a Mc Cluskey'a w nawiązaniu do kodowań ustalonych przez eksperta wiodącego. Dotyczy to zarówno pierwszej analizy wyników, jeszcze przed zastosowaniem ważności „sztucznego eksperta”, jak i po jej uwzględnieniu. Hierarchia kryteriów „sztucznego eksperta” określona została, jako średnia ważona z poszczególnych ocen ekspertów 1-6. Wagi dla poszczególnych ekspertów określone zostały zgodnie z ich indywidualnymi cechami osobowości, co jest typowe dla oceny eksperckiej rozwiązań innowacyjnych (więcej patrz [17]).

## 5. Podsumowanie

Analiza wyników przeprowadzonej optymalizacji wskazała, iż uwzględnienie opinii całego zespołu ekspertów, w kontekście ważności poszczególnych kryteriów, pozwala poszerzyć zakres optymalnych rozwiązań o 6 dodatkowych kombinacji:

- X<sub>3</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>5</sub>,
- X<sub>5</sub>, X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>4</sub>, X<sub>3</sub>,

- $X_5, X_2, X_4, X_1, X_3,$
- $X_4, X_5, X_2, X_1, X_3,$
- $X_3, X_2, X_1, X_5, X_4,$
- $X_3, X_1, X_5, X_4, X_2.$

Jednocześnie żadna z wymienionych kombinacji nie jest najlepszą z punktu widzenia algorytmu Quine'a Mc Cluskey'a, który za najlepsze rozwiązanie podaje układ  $X_1, X_3, X_5, X_4, X_2$ , (drzewo nr 9) przy liczbie gałęzi prawdziwych równej 51. Gdyby z wskazanych kombinacji wybrać te, które odpowiadają założeniu Mc Cluskey'a, o minimalnej liczbie gałęzi, to należałoby rozważyć również rozwiązania poszczególnych ekspertów:

- Nr 52/  $X_3, X_4, X_2, X_5, X_1$ / **61**;
- Nr 98/  $X_5, X_1, X_2, X_4, X_3$ / **59**;
- Nr 108/  $X_5, X_2, X_1, X_4, X_3$ / **59**;
- Nr 77/  $X_4, X_5, X_2, X_3, X_1$ / **58**;
- Nr 62/  $X_3, X_1, X_2, X_5, X_4$ / **61**;
- Nr 66/  $X_3, X_1, X_5, X_4, X_2$ / **52**.

Zastosowanie poszerzonej analizy pozwala zatem na rozważenie większej liczby alternatyw wynikających z zespołowej oceny prototypów konstrukcyjnych. Dodatkowo, umożliwia przeprowadzenie optymalizacji wg różnych zadeklarowanych funkcji celu. Przedstawiona struktura analiz z zastosowaniem przyjętych kryteriów umożliwia optymalizację z przyjęciem wielorakich założeń. Omówiona metoda może pozwolić na znalezienie rozwiązań, które w porównaniu z zastosowaniem pojedynczej metody optymalizacji, wykazują zalety: możliwość uzyskania lepszych warunków eksploatacyjnych oraz uwzględnienie większe możliwości technologiczne wykonania opracowanej konstrukcji. Bowiern przyjęte parametry: konstrukcyjne i technologiczne oraz warunki eksploatacyjne określone przez wielu ekspertów mogą zdecydować między innymi o: sprawności, trwałości czy niezawodności pomp.

#### Literatura:

1. Abel F.: Johannes Kepler and his importance to modern science. Inter Nations Bonn – Bad Godesberg, 1971.
2. Stryczek J., Stryczek S.: Pompy zębate - zarys historii. Cz. 1. SINH, Sterowanie i Napęd Hydrauliczny, 1994 r. 14 nr 2, s. 12-18.
3. Stryczek S.: Dwieście lat napędu hydrostatycznego. [W:] Napędy i sterowanie hydrauliczne '96, Oficyna Wydaw. PWroc., Wrocław, 1996. s. 6-12.
4. Osiński P., Deptuła A., Partyka M. A.: Discrete optimization of a gear pump after tooth root undercutting by means of multi-valued logic trees. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2013 vol., 13 nr 4, pp. 422-431.
5. Osiński P., Kollek W.: Assessment of energetic measuring techniques and their application to diagnosis of acoustic condition of hydraulic machinery and equipment. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2013 vol. 13, nr 3, pp. 313-321.
6. Osiński P.: Modelling and design of gear pumps with modified tooth profile. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2014.
7. Deptuła A.: Examination of acoustic properties of a gear pump after tooth root undercutting using the induction of decision trees. International journal for science, technics and innovations for the industry MTM - Machines, Technologie, Materials, Scientific technical Union of Mechanical Engineering, 2016 10/17, pp.19-22.

8. Deptuła A., Osinski P.: The Optimization of Three-Involute Tooth Outline with Taking into Consideration Multi-valued Logic Trees Mechanical Engineering. Eugeniusz Rusinski and Damian Pietrusiak (eds), Proceedings of the 13th International Scientific Conference, Springer, 2017.
9. Kudźma S., Kudźma Z.: Refined model of passive branch damper of pressure fluctuations. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015 53/ 3, pp. 557-567.
10. Kollek W., Osiński P.: Modelling and design of gear pumps. Wydawnictwo PWR, Wrocław, 2009.
11. Osiński P.: Impact of the tooth root undercutting on hydraulic and acoustic properties of gear pump, Raport PRE nr 14/2005. Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2005.
12. Partyka M. A.: The Quine- Mc Cluskey minimization algorithm of individual multiple-valued partial functions for digital control systems. 3rd Inter. Confer. Syst. Engin., Wright State University, Dayton, 1984.
13. Deptuła A.: Coefficient of the structure complexity for multi-valued decision logic trees. XLI Konf. Zast. Mat., Zakopane 2012, Inst. Mat. PAN, Warszawa, 2012.
14. Knosala R., Boratyńska Sala A., Jurczyk-Bunkowska M., Moczala A.: Zarządzanie innowacjami. PWE, Warszawa, 2014.
15. Deptuła A. M.: Określenie wag kryteriów oceny ryzyka innowacji technicznych. XLIII Konferencja Zastosowań Matematyki, Zakopane, 2014.
16. Deptuła A. M.: Metoda określenia ważności kryteriów przez eksperta w przedsiębiorstwie wdrażającym innowacje techniczne. XLIII Konferencja Zastosowań Matematyki, Zakopane, 2014.
17. Deptuła A. M., Knosala R.: Rola eksperta w ocenie ryzyka innowacji technicznych. [W:] Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji pod. red. R. Knosali, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją, Opole, 2015.

Dr inż. Anna M. DEPTUŁA

Dr inż. Adam DEPTUŁA

Instytut Innowacyjności Procesów i Produktów

Politechnika Opolska

45-370 Opole, ul. Ozimska 75

tel.: (+48 77) 449 88 45

e-mail: an.deptula@po.opole.pl

a.deptula@po.opole.pl