

# Spis treści

|                                                                                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Przedmowa</b> .....                                                                              | <b>11</b> |
| <b>1. Definicja, systematyka oraz metoda projektowania hydraulicznych maszyn zębatych</b> .....     | <b>13</b> |
| 1.1. Definicja i systematyka .....                                                                  | 13        |
| 1.2. Metoda projektowania .....                                                                     | 16        |
| <b>2. Proces przemiany energii w hydraulicznych maszynach zębatych.</b> .....                       | <b>20</b> |
| 2.1. Modele ogólne pompy i silnika .....                                                            | 20        |
| 2.1.1. Model ogólny pompy .....                                                                     | 20        |
| 2.1.2. Model ogólny silnika .....                                                                   | 21        |
| 2.2. Charakterystyki idealne i rzeczywiste pompy i silnika .....                                    | 24        |
| 2.2.1. Charakterystyki pompy .....                                                                  | 24        |
| 2.2.2. Charakterystyki silnika .....                                                                | 28        |
| 2.3. Uwagi końcowe .....                                                                            | 33        |
| <b>3. Koła zębate hydraulicznych maszyn zębatych</b> .....                                          | <b>34</b> |
| 3.1. Zęby, koła zębate i zespoły kół o zazębieniu ewolwentowym zewnętrznym .....                    | 35        |
| 3.1.1. Ząb, koło zębate o uzębieniu zewnętrznym .....                                               | 35        |
| 3.1.2. Graniczna liczba zębów, korekcja zęba zewnętrznego .....                                     | 40        |
| 3.1.3. Zespół kół ewolwentowych o zazębieniu zewnętrznym .....                                      | 41        |
| 3.1.3.1. Zespół kół niekorygowanych, zasady współpracy, liczba przyporu ...                         | 41        |
| 3.1.3.2. Zespół kół korygowanych, zasada współpracy liczba przyporu .....                           | 43        |
| 3.2. Zęby, koła zębate i zespoły kół o zazębieniu ewolwentowym wewnętrznym .....                    | 46        |
| 3.2.1. Ząb koło zębate o uzębieniu wewnętrznym .....                                                | 46        |
| 3.2.2. Graniczna liczba zębów, korekcja zęba wewnętrznego .....                                     | 48        |
| 3.2.3. Zespół kół ewolwentowych o zazębieniu wewnętrznym .....                                      | 49        |
| 3.2.3.1. Zespół kół niekorygowanych, zasady współpracy liczba przyporu ...                          | 49        |
| 3.2.3.2. Zespół kół korygowanych, zasady współpracy, liczba przyporu .....                          | 51        |
| 3.2.3.3. Interferencja zębów .....                                                                  | 53        |
| 3.3. Zęby, koła zębate i zespoły kół o zazębieniu cykloidalnym wewnętrznym .....                    | 56        |
| 3.3.1. Zęby, koła zębate i zespół kół o zazębieniu epicykloidalnym wewnętrznym niekorygowanym ..... | 56        |
| 3.3.2. Zęby, koła zębate i zespół kół o zazębieniu epicykloidalnym wewnętrznym korygowanym .....    | 61        |
| 3.3.3. Zasady współpracy w zespole kół epicykloidalnych, linia przyporu liczba przyporu .....       | 63        |

|           |                                                                                                                     |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3.4.    | Zęby, koła zębate i zespół kół o zazębieniu hipocykloidalnym wewnętrznym niekorygowanym . . . . .                   | 67         |
| 3.3.5.    | Zęby, koła zębate i zespół kół o zazębieniu hipocykloidalnym wewnętrznym korygowanym . . . . .                      | 70         |
| 3.3.6.    | Zasady współpracy w zespole kół hipocykloidalnych, linia przyporu, liczba przyporu . . . . .                        | 72         |
| 3.3.7.    | Zasady współpracy w zespole kół cykloidalnych o osiach uchomych. . . . .                                            | 74         |
| 3.3.8.    | Zasady współpracy w zespołach kół cykloidalnych wielokołowych. . . . .                                              | 77         |
| 3.4.      | Uwagi końcowe. . . . .                                                                                              | 79         |
| <b>4.</b> | <b>Kanały i szczeliny wewnętrzne w hydraulicznych maszynach zębatych . . . . .</b>                                  | <b>81</b>  |
| 4.1.      | Zespół nieruchomych kanałów i szczelin . . . . .                                                                    | 81         |
| 4.2.      | Zespół ruchomych kanałów i szczelin. . . . .                                                                        | 83         |
| 4.3.      | Zespół kanałów i szczelin w maszynach 1-szej grupy . . . . .                                                        | 84         |
| 4.3.1.    | Kanał i komora wejściowa . . . . .                                                                                  | 85         |
| 4.3.2.    | Mostek wejściowy . . . . .                                                                                          | 86         |
| 4.3.3.    | Kanał i komora wyjściowa . . . . .                                                                                  | 88         |
| 4.3.4.    | Mostek wyjściowy . . . . .                                                                                          | 89         |
| 4.3.5.    | Szczelina osiowa i promieniowa . . . . .                                                                            | 108        |
| 4.4.      | Zespół kanałów i szczelin w maszynach 2-giej grupy . . . . .                                                        | 110        |
| 4.4.1.    | Kanał i komora wejściowa . . . . .                                                                                  | 110        |
| 4.4.2.    | Mostek wejściowy . . . . .                                                                                          | 112        |
| 4.4.3.    | Kanał i komora wyjściowa . . . . .                                                                                  | 114        |
| 4.4.4.    | Mostek wyjściowy . . . . .                                                                                          | 115        |
| 4.4.5.    | Szczelina osiowa i promieniowa . . . . .                                                                            | 124        |
| 4.5.      | Zespół kanałów i szczelin w maszynach 3-ciej grupy. . . . .                                                         | 126        |
| 4.5.1.    | Kanał i komora wejściowa . . . . .                                                                                  | 126        |
| 4.5.2.    | Mostek wejściowy . . . . .                                                                                          | 128        |
| 4.5.3.    | Kanał i komora wyjściowa . . . . .                                                                                  | 130        |
| 4.5.4.    | Mostek wyjściowy . . . . .                                                                                          | 131        |
| 4.5.5.    | Szczelina osiowa i promieniowa . . . . .                                                                            | 139        |
| 4.6.      | Zespół kanałów i szczelin w maszynach 4-tej grupy . . . . .                                                         | 140        |
| 4.6.1.    | Zespół kanałów i szczelin w wielofunkcyjnej hydraulicznej maszynie zębatej WHMZ . . . . .                           | 141        |
| 4.6.2.    | Zespół kanałów i szczelin w silniku orbitalnym ORBIT . . . . .                                                      | 144        |
| 4.6.3.    | Zespół kanałów i szczelin w silniku orbitalnym z podwójnym zazębieniem cykloidalnym MAX . . . . .                   | 147        |
| 4.7.      | Uwagi końcowe. . . . .                                                                                              | 150        |
| <b>5.</b> | <b>Wydajność i pulsacja wydajności oraz chłonność i pulsacja chłonności hydraulicznych maszyn zębatych. . . . .</b> | <b>151</b> |
| 5.1.      | Wzory ogólne . . . . .                                                                                              | 152        |
| 5.1.1.    | Wydajność chwilowa . . . . .                                                                                        | 152        |
| 5.1.2.    | Wydajność właściwa, teoretyczna i średnia . . . . .                                                                 | 159        |

|           |                                                                                                                                             |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.1.3.    | Pulsacja wydajności .....                                                                                                                   | 161        |
| 5.2.      | Wydajność i pulsacja wydajności maszyn 1-szej grupy .....                                                                                   | 161        |
| 5.3.      | Wydajność i pulsacja wydajności maszyn 2-giej grupy .....                                                                                   | 167        |
| 5.4.      | Wydajność i pulsacja wydajności maszyn 3-ciej grupy .....                                                                                   | 170        |
| 5.4.1.    | Maszyny z zazębieniami epicykloidalnymi .....                                                                                               | 172        |
| 5.4.2.    | Maszyny z zazębieniami hipocykloidalnymi .....                                                                                              | 179        |
| 5.5.      | Wydajność maszyn 4-tej grupy .....                                                                                                          | 186        |
| 5.6.      | Uwagi końcowe .....                                                                                                                         | 188        |
| <b>6.</b> | <b>Ciśnienie i pulsacja ciśnienia w hydraulicznych maszynach zębatych .....</b>                                                             | <b>189</b> |
| 6.1.      | Teoretyczny przebieg zmian ciśnienia i pulsacji ciśnienia międzyzębnej komorze<br>wyporowej $T$ maszyn 1-3 grupy .....                      | 191        |
| 6.2.      | Teoretyczny przebieg zmian ciśnienia i pulsacji ciśnienia w międzyzębnej komorze<br>wyporowej w maszynach 4-tej grupy .....                 | 198        |
| 6.3.      | Uwagi końcowe .....                                                                                                                         | 201        |
| <b>7.</b> | <b>Badania wizualizacyjne procesów i zjawisk przepływowych zachodzących<br/>w kanałach i szczelinach wewnętrznych maszyn zębatych .....</b> | <b>202</b> |
| 7.1.      | Uwagi ogólne .....                                                                                                                          | 202        |
| 7.2.      | Obiekt i metoda badań wizualizacyjnych, stanowisko badawcze .....                                                                           | 202        |
| 7.3.      | Badania wizualizacyjne maszyn 1-szej grupy .....                                                                                            | 207        |
| 7.3.1.    | Kanał i komora wejściowa .....                                                                                                              | 209        |
| 7.3.2.    | Mostek wejściowy .....                                                                                                                      | 212        |
| 7.3.3.    | Kanał i komora wyjściowa .....                                                                                                              | 214        |
| 7.3.4.    | Mostek wyjściowy .....                                                                                                                      | 215        |
| 7.3.5.    | Rowki odciążające w strefie mostka wyjściowego .....                                                                                        | 220        |
| 7.3.6.    | Szczelina osiowa .....                                                                                                                      | 224        |
| 7.4.      | Badania wizualizacyjne maszyn 2-giej grupy .....                                                                                            | 226        |
| 7.4.1.    | Kanał i komora wejściowa .....                                                                                                              | 228        |
| 7.4.2.    | Mostek wejściowy .....                                                                                                                      | 229        |
| 7.4.3.    | Kanał i komora wyjściowa .....                                                                                                              | 231        |
| 7.4.4.    | Mostek wyjściowy .....                                                                                                                      | 232        |
| 7.5.      | Badania wizualizacyjne maszyn 3-ciej grupy .....                                                                                            | 235        |
| 7.5.1.    | Kanał i komora wejściowa .....                                                                                                              | 238        |
| 7.5.2.    | Mostek wejściowy .....                                                                                                                      | 239        |
| 7.5.3.    | Kanał i komora wyjściowa .....                                                                                                              | 245        |
| 7.5.4.    | Mostek wyjściowy .....                                                                                                                      | 245        |
| 7.6.      | Wnioski z badań .....                                                                                                                       | 247        |
| <b>8.</b> | <b>Badanie ciśnienia w kanałach i szczelinach wewnętrznych w hydraulicznych<br/>maszynach zębatych .....</b>                                | <b>251</b> |
| 8.1.      | Obiekt i metoda badań, stanowisko badawcze .....                                                                                            | 251        |
| 8.2.      | Badania ciśnień w kanałach i szczelinach wewnętrznych maszyn 1-szej grupy .....                                                             | 252        |
| 8.2.1.    | Badania pompy zębatej I bez kompensacji luzów osiowych .....                                                                                | 252        |

|            |                                                                                                                                                                                           |            |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.2.2.     | Badania pompy zębatej II z kompensacją luzów osiowych . . . . .                                                                                                                           | 262        |
| 8.3.       | Badania ciśnień w kanałach i szczelinach maszyn 2-szej i 3-ciej grupy. . . . .                                                                                                            | 270        |
| 8.4.       | Uwagi końcowe . . . . .                                                                                                                                                                   | 283        |
| <b>9.</b>  | <b>Projektowanie korpusów hydraulicznych maszyn zębatych. . . . .</b>                                                                                                                     | <b>285</b> |
| 9.1.       | Metoda projektowania korpusów hydraulicznych maszyn zębatych . . . . .                                                                                                                    | 285        |
| 9.2.       | Ustalenie wymagań konstrukcyjnych i technologicznych dla korpusów pomp . . . . .                                                                                                          | 286        |
| 9.3.       | Ustalenie kształtów podstawowych pomp. . . . .                                                                                                                                            | 287        |
| 9.4.       | Badania wytrzymałościowe korpusów pomp zębatych o kształtach podstawowych metodą FEM . . . . .                                                                                            | 290        |
| 9.4.1.     | Modele geometryczne, obciążenia i utwierdzenia . . . . .                                                                                                                                  | 290        |
| 9.4.2.     | Modele numeryczne, program badań . . . . .                                                                                                                                                | 293        |
| 9.4.3.     | Wyniki badań wytrzymałościowych korpusów o kształtach podstawowych. . . . .                                                                                                               | 294        |
| 9.5.       | Modyfikacja globalna i lokalna korpusu o kształcie podstawowym. . . . .                                                                                                                   | 298        |
| 9.6.       | Badania wytrzymałościowe korpusów pomp o kształtach zmodyfikowanych metodą FEM . . . . .                                                                                                  | 300        |
| 9.7.       | Przyjęcie ostatecznych kształtów korpusów . . . . .                                                                                                                                       | 302        |
| 9.8.       | Uwagi końcowe . . . . .                                                                                                                                                                   | 303        |
| <b>10.</b> | <b>Projektowanie zespołu kompensacji luzów osiowych . . . . .</b>                                                                                                                         | <b>304</b> |
| 10.1.      | Zasada kompensacji luzów osiowych. Metoda projektowania zespołu kompensacji luzów osiowych. . . . .                                                                                       | 304        |
| 10.2.      | Projektowanie zespołu kompensacji luzów osiowych w maszynach 1-szej grupy. . . . .                                                                                                        | 307        |
| 10.2.1.    | Przyjęcie rozwiązania konstrukcyjnego zespołu kompensacyjnego . . . . .                                                                                                                   | 307        |
| 10.2.2.    | Wyznaczenie powierzchni $A_p$ oddziaływania ciśnienia w szczelinie osiowej i podział tej powierzchni na powierzchnie cząstkowe $A_{pi}$ . . . . .                                         | 308        |
| 10.2.3.    | Określenie rozkładu ciśnienia cząstkowego $p_i$ działającego na powierzchnie cząstkowe $A_{pi}$ . . . . .                                                                                 | 310        |
| 10.2.4.    | Określenia cząstkowych sił odpychających $F_{pi}$ i całkowitej siły odpychającej $F_p$ . . . . .                                                                                          | 312        |
| 10.2.5.    | Określenie cząstkowych momentów sił odpychających $M_{pi}$ oraz całkowitego momentu sił odpychających $M_p$ . . . . .                                                                     | 313        |
| 10.2.6.    | Określenie punktów przyłożenia $x_{pi}$ , $y_{pi}$ cząstkowych sił odpychających $F_{pi}$ oraz punktu przyłożenia $x_p$ , $y_p$ całkowitej siły odpychającej $F_p$ . . . . .              | 319        |
| 10.2.7.    | Kształtowanie całkowitej powierzchni kompensacyjnej $A_c$ oraz jej podział na powierzchnie cząstkowe $A_{ci}$ . Określenie ciśnienia kompensacyjnego $p_c$ . . . . .                      | 320        |
| 10.2.8.    | Określenie cząstkowych sił kompensacyjnych $F_{ci}$ oraz całkowitej siły kompensacyjnej $F_c$ . . . . .                                                                                   | 323        |
| 10.2.9.    | Określenie współrzędnych $x_{ci}$ , $y_{ci}$ punktów przyłożenia cząstkowych sił kompensacyjnych $F_{ci}$ oraz współrzędnych $x_c$ , $y_c$ całkowitej siły kompensacyjnej $F_c$ . . . . . | 323        |
| 10.2.10.   | Porównanie całkowitej siły odpychającej $F_p$ oraz punktu jej przyłożenia $x_p$ , $y_p$ z całkowitą siłą kompensacyjną $F_c$ i punktem jej przyłożenia $x_c$ , $y_c$ . . . . .            | 324        |

|                                                                                                                                                                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.3. Projektowanie zespołu kompensacji luzów osiowych w maszynach 2-giej grupy . . . . .                                                                                                                                        | 326        |
| 10.3.1. Przyjęcie rozwiązania konstrukcyjnego zespołu kompensacyjnego . . . . .                                                                                                                                                  | 326        |
| 10.3.2. Wyznaczenie częściowych sił odpychających $F_{pi}$ oraz całkowitej siły odpychającej $F_p$ . . . . .                                                                                                                     | 327        |
| 10.3.3. Określenie punktów przyłożenia $x_{pi}$ , $y_{pi}$ cząstkowych sił odpychających $F_{pi}$ oraz punktu przyłożenia $x_p$ , $y_p$ całkowitej siły odpychającej $F_p$ . . . . .                                             | 332        |
| 10.3.4. Kształtowanie całkowitej powierzchni kompensacyjnej $A_c$ oraz jej podział na powierzchnie cząstkowe $A_{ci}$ . Określenie ciśnienia kompensacyjnego $p_c$ . . .                                                         | 335        |
| 10.3.5. Określenie cząstkowych sił kompensacyjnych $F_{ci}$ i współrzędnych $x_{ci}$ , $y_{ci}$ punktów ich przyłożenia oraz całkowitej siły kompensacyjnej $F_c$ i współrzędnych $x_c$ , $y_c$ punktu jej przyłożenia . . . . . | 337        |
| 10.3.6. Porównanie całkowitej siły odpychającej $F_p$ oraz punktu jej przyłożenia $x_p$ , $y_p$ z całkowitą siłą kompensacyjną $F_c$ i punktem jej przyłożenia $x_c$ , $y_c$ . . . . .                                           | 338        |
| 10.4. Projektowanie zespołu kompensacji luzów osiowych w maszynie 3-ciej grupy . . . . .                                                                                                                                         | 340        |
| 10.5. Projektowanie zespołu kompensacji luzów osiowych w maszynie 4-tej grupy . . . . .                                                                                                                                          | 342        |
| 10.6. Uwagi końcowe. . . . .                                                                                                                                                                                                     | 346        |
| <b>11. Rozwiązania konstrukcyjne hydraulicznych maszyn zębatych . . . . .</b>                                                                                                                                                    | <b>348</b> |
| <b>Literatura. . . . .</b>                                                                                                                                                                                                       | <b>363</b> |