

Spis treści

|                                                                                                   |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Przedmowa</b>                                                                                  | <b>XI</b> |
| <b>1. Podział przekładni ślimakowych</b>                                                          | <b>1</b>  |
| <b>I. MODELOWANIE I OBLICZANIE ROZKŁADU OBCIĄŻENIA W ZAZĘBIENIACH ŚLIMAKOWYCH</b>                 | <b>9</b>  |
| Wykaz oznaczeń użytych w tekście części I                                                         | 10        |
| <b>2. Wstęp do części I</b>                                                                       | <b>12</b> |
| <b>3. Teoria zazębień ślimakowych</b>                                                             | <b>18</b> |
| 3.1. Wprowadzenie                                                                                 | 18        |
| 3.2. Linie styku w zazębieniu ślimakowym                                                          | 22        |
| <b>4. Modele zazębień</b>                                                                         | <b>25</b> |
| <b>5. Równania ugięć płyt</b>                                                                     | <b>29</b> |
| 5.1. Ugięcia płyty prostokątnej                                                                   | 29        |
| 5.2. Równanie ugięć płyty kołowej                                                                 | 31        |
| <b>6. Odkształcenia płyt prostokątnych</b>                                                        | <b>33</b> |
| 6.1. Ugięcia cienkiej nieskończenie długiej płyty wspornikowej pod działaniem siły skupionej      | 33        |
| 6.1.1. Warunki brzegowe i rozwiązanie zagadnienia                                                 | 34        |
| 6.2. Ugięcia cienkiej nieskończenie długiej płyty wspornikowej pod dowolnym obciążeniem normalnym | 42        |
| 6.3. Odkształcenia grubej płyty wspornikowej o skończonej długości                                | 47        |
| 6.4. Ugięcia teoretyczne i doświadczalne grubych płyt wspornikowych o skończonej długości         | 60        |
| <b>7. Rozkład obciążenia między dwiema płytami stykającymi się wzdłuż dowolnej linii</b>          | <b>69</b> |
| 7.1. Układ płyt wspornikowych cienkich                                                            | 69        |
| 7.1.1. Przykład                                                                                   | 72        |
| 7.2. Układ płyt wspornikowych grubych                                                             | 73        |
| 7.3. Wyniki obliczeń układów płytowych                                                            | 74        |
| 7.4. Podsumowanie                                                                                 | 77        |
| <b>8. Odkształcenia i naprężenia w płytach traktowanych jako model zazębienia globoidalnego</b>   | <b>79</b> |

|                                                                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.1. Warunki brzegowe kołowej płyty wspornikowej                                                              | 79         |
| 8.2. Różnice skończone we współrzędnych biegunowych                                                           | 82         |
| 8.3. Różnice skończone w rozwiązaniach płyt kołowych                                                          | 89         |
| 8.4. Ugięcia płyty w kształcie wycinka pierścienia kołowego                                                   | 95         |
| 8.5. Ugięcia kołowej płyty wspornikowej pod dowolnym obciążeniem normalnym                                    | 97         |
| 8.6. Ugięcia płyty wspornikowej w kształcie wycinka pierścienia kołowego obciążonej normalną siłą skupioną    | 98         |
| 8.7. Podsumowanie                                                                                             | 103        |
| <b>9. Rozkłady obciążeń w zazębieniach ślimakowych</b>                                                        | <b>104</b> |
| 9.1. Wprowadzenie                                                                                             | 104        |
| 9.2. Współpraca płyt wspornikowych jako model zazębienia ślimakowego                                          | 105        |
| 9.2.1. Przykład                                                                                               | 105        |
| 9.3. Współpraca płyt wspornikowych kołowej i prostokątnej odwzorowujących zazębienie globoidalne              | 109        |
| <b>10. Badania eksperymentalne</b>                                                                            | <b>113</b> |
| 10.1. Przygotowanie modeli do badań                                                                           | 113        |
| 10.1.1. Podobieństwo mechaniczne                                                                              | 117        |
| 10.2. Opis stanowiska badawczego                                                                              | 118        |
| 10.3. Przebieg procesu badań                                                                                  | 119        |
| 10.4. Wyznaczanie naprężeń rzeczywistych                                                                      | 121        |
| 10.5. Interpretacja otrzymanych wyników dla przekładni ślimakowej walcowej                                    | 122        |
| 10.6. Interpretacja otrzymanych wyników dla przekładni ślimakowej globoidalnej                                | 125        |
| <b>11. Metody numeryczne w odwzorowaniach geometrycznych konstrukcji</b>                                      | <b>132</b> |
| 11.1. Wprowadzenie                                                                                            | 132        |
| 11.2. Modelowanie zazębienia ślimakowego metodą MES                                                           | 134        |
| 11.3. Warunki brzegowe oraz sposoby obciążania zazębienia ślimakowego                                         | 139        |
| 11.4. Linie styku i rozkład obciążenia                                                                        | 140        |
| 11.5. Analiza otrzymanych wyników                                                                             | 145        |
| 11.6. Podsumowanie                                                                                            | 146        |
| <b>12. Wady i zalety metod elementów skończonych i różnic skończonych w obliczeniach zazębień ślimakowych</b> | <b>147</b> |
| <b>13. Podsumowanie rozważań dotyczących modelowych zazębień ślimakowych</b>                                  | <b>149</b> |
| <b>II. PROJEKTOWANIE I KONSTRUOWANIE PRZEKŁADNI ŚLIMAKOWYCH</b>                                               | <b>151</b> |
| Wykaz oznaczeń użytych w tekście części II                                                                    | 152        |

## **14. Wstęp do części II** **156**

### **15. Bariery wytrzymałościowe i eksploatacyjne ograniczające pracę przekładni ślimakowych** **161**

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 15.1. Wprowadzenie                                                                                    | 161 |
| 15.2. Ciepłota granica obciążalności przekładni ślimakowych                                           | 167 |
| 15.2.1. Dopuszczalna temperatura pracy przekładni ślimakowej                                          | 167 |
| 15.2.2. Określenie temperatury pracy                                                                  | 168 |
| 15.2.3. Wyznaczanie temperatury pracy                                                                 | 169 |
| 15.2.4. Temperatura pracy przekładni ślimakowej smarowanej<br>rozbiórkowo                             | 171 |
| 15.2.5. Temperatura oleju w misie olejowej                                                            | 172 |
| 15.2.6. Temperatura koła ślimakowego nurzającego się w oleju                                          | 173 |
| 15.2.7. Średnia temperatura koła ślimakowego przekładni smarowanej<br>ciśnieniowo                     | 174 |
| 15.2.8. Uwarunkowania i ograniczenia wzorów określających<br>temperaturę pracy przekładni ślimakowych | 175 |
| 15.3. Ugięcie wału ślimaka                                                                            | 176 |
| 15.4. Odporność na pitting zazębienia ślimakowego                                                     | 179 |
| 15.4.1. Naprężenia w styku                                                                            | 181 |
| 15.4.2. Dopuszczalne naprężenia kontaktowe                                                            | 184 |
| 15.4.2.1. Graniczna wytrzymałość materiału na pitting                                                 | 184 |
| 15.4.2.2. Współczynnik trwałości                                                                      | 185 |
| 15.4.2.3. Współczynnik prędkości poślizgu                                                             | 185 |
| 15.4.2.4. Współczynnik wielkości przekładni                                                           | 187 |
| 15.4.2.5. Współczynnik rodzaju środka smarnego                                                        | 188 |
| 15.5. Wytrzymałość stopy zęba koła ślimakowego                                                        | 188 |
| 15.5.1. Rzeczywista wytrzymałość podstawy stopy zęba                                                  | 189 |
| 15.5.2. Określenie naprężeń ścinających w podstawie zęba koła<br>ślimakowego                          | 191 |
| 15.5.2.1. Współczynnik rozkładu obciążenia                                                            | 192 |
| 15.5.2.2. Współczynnik grubości podstawy zęba                                                         | 192 |
| 15.5.2.3. Współczynnik kąta pochylenia zębów                                                          | 193 |
| 15.5.2.4. Współczynnik grubości wieńca                                                                | 193 |
| 15.5.3. Dopuszczalne naprężenia ścinające                                                             | 194 |
| 15.5.3.1. Wytrzymałość na ścinanie                                                                    | 194 |
| 15.5.3.2. Współczynnik trwałości                                                                      | 194 |
| 15.6. Film olejowy                                                                                    | 196 |
| 15.6.1. Grubość filmu olejowego w zazębieniu ślimakowym                                               | 197 |
| 15.6.2. Współczynnik lepkości                                                                         | 197 |
| 15.6.3. Lepkość dynamiczna środka smarnego                                                            | 198 |
| 15.6.4. Prędkość obrotowa ślimaka                                                                     | 198 |
| 15.6.5. Odległość osi                                                                                 | 199 |
| 15.6.6. Moduł sprężystości Younga                                                                     | 199 |
| 15.6.7. Obciążenie przekładni                                                                         | 199 |
| 15.6.8. Parametr grubości filmu olejowego                                                             | 200 |

|                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 15.7. Ścierne zużycie zębów w przekładniach ślimakowych                                              | 202        |
| 15.7.1. Współczynnik bezpieczeństwa                                                                  | 203        |
| 15.7.2. Ścierne zużycie powierzchni zębów                                                            | 203        |
| 15.7.3. Graniczna wartość zużycia ściernego                                                          | 204        |
| 15.7.4. Moduł sprężystości                                                                           | 204        |
| 15.7.5. Liczba cykli                                                                                 | 204        |
| 15.7.6. Naprężenia herzowskie                                                                        | 204        |
| 15.7.7. Parametr drogi poślizgu                                                                      | 205        |
| 15.7.8. Intensywność zużycia                                                                         | 205        |
| 15.7.9. Dopuszczalne zużycie powierzchni zębów                                                       | 206        |
| <b>16. Obliczenia projektowe przekładni ślimakowych</b>                                              | <b>209</b> |
| 16.1. Wytyczne do projektowania                                                                      | 209        |
| 16.2. Obliczanie zasadniczych wielkości przekładni ślimakowych                                       | 219        |
| 16.3. Korekcje zazębień ślimakowych                                                                  | 224        |
| 16.4. Prędkości poślizgów                                                                            | 226        |
| 16.5. Przykład obliczeniowy                                                                          | 227        |
| <b>17. Wielkości geometryczne i konstrukcyjne przekładni ślimakowych</b>                             | <b>231</b> |
| 17.1. Wprowadzenie                                                                                   | 231        |
| 17.2. Obliczenia innych wielkości geometrycznych i konstrukcyjnych zazębienia przekładni ślimakowych | 234        |
| 17.2.1. Wielkości geometryczne uzębienia ślimaka                                                     | 234        |
| 17.2.2. Wielkości geometryczne uzębienia koła ślimakowego                                            | 236        |
| 17.3. Wielkości konstrukcyjne przekładni                                                             | 238        |
| 17.4. Rzeczywista długość uzwojenia ślimaka i szerokość uzębienia koła ślimakowego                   | 239        |
| 17.4.1. Przykład                                                                                     | 247        |
| 17.5. Stopień pokrycia w przekładniach ślimakowych                                                   | 250        |
| 17.6. Siły występujące w zazębieniu ślimakowym                                                       | 253        |
| 17.7. Przykład                                                                                       | 256        |
| <b>18. Straty mocy i sprawność</b>                                                                   | <b>260</b> |
| 18.1. Sprawność zazębienia                                                                           | 260        |
| 18.1.1. Współczynniki tarcia                                                                         | 262        |
| 18.1.1.1. Współczynnik wielkości przekładni                                                          | 263        |
| 18.1.1.2. Współczynnik wielkości geometrycznych przekładni                                           | 264        |
| 18.1.1.3. Współczynnik skojarzenia materiałowego                                                     | 264        |
| 18.1.1.4. Współczynnik chropowatości                                                                 | 264        |
| 18.2. Straty mocy w przekładni                                                                       | 265        |
| 18.2.1. Strata mocy w zazębieniu ślimakowym                                                          | 265        |
| 18.2.2. Strata mocy biegu jałowego                                                                   | 266        |
| 18.2.3. Straty mocy w łożyskach                                                                      | 266        |
| 18.2.4. Straty mocy na uszczelnieniach                                                               | 267        |
| 18.3. Sprawność całkowita przekładni ślimakowej                                                      | 268        |
| 18.4. Przykład                                                                                       | 268        |

|                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>19. Samohamowność przekładni ślimakowych</b>                                 | <b>271</b> |
| <b>20. Łożyskowanie wałów przekładni ślimakowej</b>                             | <b>274</b> |
| 20.1. Wprowadzenie                                                              | 274        |
| 20.2. Odległość łożysk                                                          | 279        |
| 20.3. Przykład                                                                  | 281        |
| <b>21. Kształtowanie korpusów przekładni ślimakowych</b>                        | <b>285</b> |
| <b>22. Dobór przekładni ślimakowych w układach napędowych</b>                   | <b>293</b> |
| 22.1. Wprowadzenie                                                              | 293        |
| 22.2. Określenie obciążenia mechanicznego                                       | 294        |
| 22.3. Obciążenie cieplne przekładni                                             | 300        |
| 22.4. Przykład obliczeniowy                                                     | 302        |
| <b>23. Obliczenia sprawdzające</b>                                              | <b>304</b> |
| 23.1. Obliczenia wskaźnika obciążalności cieplnej                               | 304        |
| 23.2. Obliczenia wskaźnika odporności na pitting                                | 306        |
| 23.3. Obliczenia wskaźnika wytrzymałości stopy zęba                             | 308        |
| 23.4. Obliczenia wskaźnika ugięcia wału ślimaka                                 | 310        |
| 23.5. Obliczenia średniej minimalnej grubości filmu olejowego                   | 310        |
| 23.6. Obliczenia współczynnika ściernego zużycia zębów                          | 312        |
| 23.7. Wyniki obliczeń                                                           | 314        |
| <b>24. Trwałość przekładni ślimakowych - przykład</b>                           | <b>316</b> |
| 24.1. Określenie czasu eksploatacji                                             | 316        |
| 24.1.1. Zredukowana wartość modułu sprężystości                                 | 318        |
| 24.1.2. Współczynnik średniego zużycia ściernego zębów                          | 318        |
| 24.1.3. Parametr średniej drogi poślizgu                                        | 321        |
| 24.1.4. Średnie naprężenia w styku                                              | 321        |
| 24.2. Obliczenia sprawności                                                     | 322        |
| 24.2.1. Strata mocy w zazębieniu                                                | 323        |
| 24.2.2. Strata mocy biegu jałowego                                              | 323        |
| 24.2.3. Strata mocy w łożyskach                                                 | 324        |
| 24.2.4. Strata mocy na uszczelnieniach                                          | 324        |
| 24.3. Określenie stopnia samohamowności                                         | 324        |
| <b>III. EKSPLOATACJA PRZEKŁADNI ŚLIMAKOWYCH</b>                                 | <b>325</b> |
| Wykaz oznaczeń użytych w tekście części III                                     | 326        |
| <b>25. Wstęp do części III</b>                                                  | <b>328</b> |
| <b>26. Elastotermohydrodynamiczna teoria smarowania w zazębieniu ślimakowym</b> | <b>331</b> |
| 26.1. Wprowadzenie                                                              | 331        |
| 26.2. Równanie ruchu                                                            | 334        |

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 26.3. Równanie energii                                                       | 335        |
| 26.4. Temperaturowe warunki brzegowe                                         | 335        |
| 26.5. Temperatura, lepkość i współczynnik tarcia                             | 338        |
| <b>27. Badanie rodzaju tarcia</b>                                            | <b>340</b> |
| 27.1. Wprowadzenie                                                           | 340        |
| 27.2. Wpływ prędkości hydrodynamicznej                                       | 344        |
| 27.3. Wpływ lepkości oleju                                                   | 346        |
| 27.4. Wpływ obciążenia przekładni                                            | 348        |
| 27.5. Zmiany rodzaju tarcia w początkowej fazie pracy przekładni             | 349        |
| 27.6. Wpływ ciśnienia oleju                                                  | 350        |
| 27.7. Uwagi, wnioski i wytyczne eksploatacyjne                               | 352        |
| <b>28. Stalowe i żeliwne koła ślimakowe</b>                                  | <b>354</b> |
| 28.1. Wprowadzenie                                                           | 354        |
| 28.2. Sprawność i obciążalność przekładni                                    | 356        |
| 28.3. Identyfikacja rodzaju tarcia                                           | 359        |
| 28.4. Badania trwałościowe                                                   | 363        |
| 28.5. Podsumowanie badań                                                     | 363        |
| <b>29. Środki smarne</b>                                                     | <b>365</b> |
| 29.1. Baza olejów                                                            | 365        |
| 29.2. Dodatki uszlachetniające                                               | 366        |
| 29.3. Lepkość oleju                                                          | 369        |
| 29.4. Klasyfikacja lepkościowa olejów                                        | 372        |
| 29.4.1. Klasyfikacja olejów wg DIN                                           | 374        |
| 29.4.2. Klasyfikacja olejów wg GOST                                          | 374        |
| 29.4.3. Klasyfikacja olejów wg PN                                            | 374        |
| 29.5. Zamiana i mieszanie olejów                                             | 376        |
| 29.6. Krajowe oleje mineralne stosowane do smarowania przekładni ślimakowych | 377        |
| 29.7. Smary plastyczne do smarowania przekładni ślimakowych                  | 380        |
| 29.7.1. Podział na klasy konsystencji                                        | 380        |
| 29.7.2. Zalecane smary plastyczne w stosowaniu do przekładni ślimakowych     | 380        |
| <b>30. Smarowanie przekładni ślimakowych</b>                                 | <b>383</b> |
| 30.1. Przekładnie ślimakowe smarowane olejami                                | 383        |
| 30.2. Smarowanie zanurzeniowe przekładni ślimakowych                         | 386        |
| 30.3. Smarowanie ciśnieniowe przekładni ślimakowych                          | 388        |
| 30.4. Częstość wymiany oleju                                                 | 390        |
| 30.5. Przekładnie ślimakowe smarowane smarami plastycznymi                   | 392        |
| <b>31. Montaż i docieranie</b>                                               | <b>394</b> |
| 31.1. Ustawianie śladów współpracy                                           | 394        |
| 31.2. Procesy docierania przekładni ślimakowych                              | 396        |

|                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>32. Wpływ rodzaju oleju na sprawność przekładni zębatych</b>                    | <b>399</b> |
| 32.1. Warunki badań                                                                | 399        |
| 32.2. Przebieg badań                                                               | 400        |
| 32.3. Wyniki badań                                                                 | 401        |
| <b>33. Stan i perspektywy rozwoju przekładni ślimakowych</b>                       | <b>407</b> |
| 33.1. Wprowadzenie                                                                 | 407        |
| 33.2. Obecny stan techniki                                                         | 409        |
| 33.3. Konstrukcje przekładni ślimakowych                                           | 410        |
| 33.4. Obciążalność przekładni ślimakowych                                          | 411        |
| 33.5. Najistotniejsze osiągnięcia ostatnich lat                                    | 412        |
| 33.5.1. Oleje syntetyczne                                                          | 412        |
| 33.5.2. Optymalizacja geometrii zazębienia                                         | 413        |
| 33.5.3. Postęp w technice wytwarzania                                              | 414        |
| 33.6. Tendencje i kierunki badań                                                   | 415        |
| 33.6.1. Ślady przylegania i błędy powierzchni współpracujących                     | 416        |
| 33.6.2. Sprawdzanie koła ślimakowego                                               | 416        |
| 33.6.3. Nośność przekładni                                                         | 417        |
| 33.6.4. Dodatki uszlachetniające do olejów                                         | 417        |
| <b>Literatura</b>                                                                  | <b>418</b> |
| <b>Spis rysunków</b>                                                               | <b>429</b> |
| <b>Spis tabel</b>                                                                  | <b>438</b> |
| <b>ANEKS</b>                                                                       | <b>440</b> |
| <b>Załącznik 1 - wartości współczynników ugięć płyty wspornikowej prostokątnej</b> | <b>441</b> |
| <b>Załącznik 2 - programy obliczania krzywych a, b, c</b>                          | <b>472</b> |

oprac. BPK