

## Spis treści

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Od autora .....                                                                                                       | 7  |
| Wykaz ważniejszych oznaczeń.....                                                                                      | 9  |
| 1. WPROWADZENIE.....                                                                                                  | 17 |
| 2. PODSTAWOWE PROBLEMY EKSPLOATACJI .....                                                                             | 17 |
| 2.1. Kierunki rozwoju eksploatacji.....                                                                               | 18 |
| 2.2. Model systemu eksploatacji .....                                                                                 | 19 |
| 2.3. Stany eksploatacyjne .....                                                                                       | 22 |
| 2.4. Wybrane zagadnienia eksploatacji .....                                                                           | 24 |
| 3. ANALIZA OKRESU EKSPLOATACJI.....                                                                                   | 25 |
| 3.1. Okresy eksploatacji .....                                                                                        | 27 |
| 3.1.1. Fizyczny okres eksploatacji .....                                                                              | 27 |
| 3.1.2. Ekonomiczny okres eksploatacji .....                                                                           | 28 |
| 3.1.3. Optymalny okres eksploatacji .....                                                                             | 30 |
| 3.2. Charakterystyka metod utrzymania .....                                                                           | 31 |
| 3.3. Wskaźnik eksploatacji obiektu z odnową.....                                                                      | 36 |
| 4. ANALIZA EKSPLOATACYJNA TRWAŁOŚCI .....                                                                             | 39 |
| 4.1. Podstawowe pojęcia – definicje .....                                                                             | 39 |
| 4.2. Sposoby zwiększania niezawodności .....                                                                          | 41 |
| 4.3. Wskaźniki niezawodności .....                                                                                    | 42 |
| 4.3.1. Oszacowanie wskaźników niezawodności, gdy postać funkcyjna<br>rozkładu zmiennej losowej $T$ jest nieznana..... | 43 |
| 4.3.2. Oszacowanie wskaźników niezawodności przy znanej funkcji<br>rozkładu .....                                     | 51 |
| 4.3.2.1. Rozkład Weibulla.....                                                                                        | 52 |
| 4.4. Badania eksploatacyjne trwałości tramwaju.....                                                                   | 58 |
| 4.4.1. Metodyka badań .....                                                                                           | 58 |
| 4.4.2. Wyniki badań eksploatacyjnych trwałości tramwaju .....                                                         | 60 |
| 4.4.3. Analiza wyników badań .....                                                                                    | 65 |
| 4.4.4. Wnioski i aplikacja wyników badań .....                                                                        | 66 |
| 4.5. Badania eksploatacyjne trwałości kół tocznych pojazdu szynowego.....                                             | 67 |
| 4.5.1. Podstawowe aspekty zużycia zestawów kołowych.....                                                              | 67 |
| 4.5.2. Analiza eksploatacyjna trwałości wagonu towarowego.....                                                        | 71 |
| 4.5.3. Wnioski .....                                                                                                  | 74 |
| 5. ZAGADNIENIA EKONOMICZNE .....                                                                                      | 74 |
| 5.1. Wprowadzenie.....                                                                                                | 74 |
| 5.2. Wskaźniki rentowności .....                                                                                      | 75 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3. Próg rentowności .....                                             | 76  |
| 5.4. Rentowność eksploatacji .....                                      | 79  |
| 5.4.1. Analiza eksploatacyjna rentowności .....                         | 81  |
| 6. PROCESY ZUŻYCIA .....                                                | 85  |
| 6.1. Oddziaływanie elementów maszyn .....                               | 85  |
| 6.1.1. Teorie i prawa tarcia .....                                      | 85  |
| 6.1.2. Wybrane procesy kontaktowe elementów maszyn .....                | 89  |
| 6.1.2.1. Odształcenia sprężyste .....                                   | 90  |
| 6.1.2.2. Odształcenia plastyczne .....                                  | 92  |
| 6.1.2.3. Adhezja .....                                                  | 94  |
| 6.1.2.4. Dekohezja .....                                                | 96  |
| 6.1.2.5. Mikroskrawanie .....                                           | 99  |
| 6.1.2.6. Chemisorpcja. Adsorpcja. Absorpcja .....                       | 100 |
| 6.2. Procesy wiodące zużycia .....                                      | 102 |
| 6.2.1. Definicja zużycia .....                                          | 102 |
| 6.2.2. Klasyfikacja zużycia .....                                       | 103 |
| 6.2.3. Krzywe zużycia .....                                             | 104 |
| 6.2.4. Dokumentacja odmian zużycia .....                                | 106 |
| 6.2.4.1. Zużycie ścierne .....                                          | 106 |
| 6.2.4.2. Zużycie adhezyjne .....                                        | 109 |
| 6.2.4.3. Zużycie zmęczeniowe .....                                      | 110 |
| 6.2.4.4. Zużycie plastyczne .....                                       | 117 |
| 6.2.4.5. Zużycie korozyjne .....                                        | 118 |
| 6.2.4.6. Zużycie erozyjne .....                                         | 121 |
| 6.2.4.7. Zużycie kawitacyjne .....                                      | 122 |
| 6.2.4.8. Zużycie cieplne .....                                          | 125 |
| 6.2.5. Nieprawność techniczna obiektu w aspekcie cech pomiarowych ..... | 126 |
| 7. TEMPERATURA W STREFIE TARCIA .....                                   | 129 |
| 7.1. Temperatura pary ciernej koło wagonu–klocek hamulcowy .....        | 129 |
| 7.1.1. Podstawowe założenia .....                                       | 130 |
| 7.1.2. Podstawowe wzory .....                                           | 133 |
| 7.1.3. Temperatura powierzchni ciernej obręczy podczas hamowania .....  | 136 |
| 7.1.4. Analiza porównawcza wyników badań .....                          | 136 |
| 7.2. Temperatura błysku w strefie czopa wału wykorbionego .....         | 140 |
| 7.3. Temperatura w strefie styku zębów przekładni zębatej .....         | 142 |
| 8. MONITORING POJAZDÓW SZYNOWYCH .....                                  | 143 |
| 8.1. Monitoring zużycia kół jezdnych tramwaju .....                     | 143 |
| 8.1.1. Ogólna charakterystyka stanowiska .....                          | 145 |
| 8.1.2. Technika pomiarów .....                                          | 146 |
| 8.1.3. Wizualizacja pomiarów .....                                      | 149 |

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1.4. Komputerowa baza danych .....                                           | 152 |
| 8.1.5. Podsumowanie .....                                                      | 153 |
| 8.2. Monitoring obciążeń i nacisków kół pojazdów szynowych .....               | 154 |
| 8.2.1. Wprowadzenie.....                                                       | 154 |
| 8.2.2. Waga stała do kontroli w ruchu.....                                     | 154 |
| 8.2.3. Waga przenośna do kontroli w ruchu.....                                 | 157 |
| 8.2.4. Waga stacjonarna .....                                                  | 159 |
| 8.2.5. Podsumowanie .....                                                      | 165 |
| 8.3. Badania defektoskopowe.....                                               | 165 |
| 8.3.1. Badania defektoskopowe osi zestawu kołowego .....                       | 172 |
| 8.3.2. Badania defektoskopowe obręczy .....                                    | 175 |
| 8.3.3. Badanie defektoskopowe klocków hamulcowych .....                        | 175 |
| 9. EKOLOGIA W EKSPLOATACJI POJAZDÓW SZYNOWYCH .....                            | 178 |
| 9.1. Oddziaływanie pojazdów szynowych na środowisko .....                      | 178 |
| 9.2. Podstawowe zagadnienia związane z hałasem .....                           | 180 |
| 9.3. Oddziaływanie drgań i hałasu na narządy człowieka .....                   | 184 |
| 9.4. Normy dopuszczalnego hałasu pojazdów szynowych.....                       | 188 |
| 9.5. Metodyka pomiarów hałasu w pojazdach szynowych .....                      | 189 |
| 9.6. Wpływ eksploatacji pojazdów szynowych na propagację hałasu .....          | 193 |
| 9.6.1. Wpływ eksploatacji tramwaju na propagację hałasu .....                  | 193 |
| 9.7. Metody techniczne ograniczenia hałasu .....                               | 194 |
| 9.7.1. Wpływ układu hamulcowego na powstawanie hałasu .....                    | 194 |
| 9.7.2. Zmniejszenie emisji hałasu w komunikacji tramwajowej.....               | 197 |
| 9.8. Metody organizacyjne ograniczenia hałasu.....                             | 199 |
| 10. BADANIA TRIBOLOGICZNE W ASPEKCIE HAŁASU .....                              | 203 |
| 10.1. Badania laboratoryjne.....                                               | 205 |
| 10.1.1. Charakterystyki współczynnika tarcia .....                             | 205 |
| 10.1.2. Badanie zużycia .....                                                  | 205 |
| 10.1.3. Pomiar przyspieszenia.....                                             | 207 |
| 10.1.4. Wyniki pomiaru hałasu .....                                            | 208 |
| 10.1.5. Wnioski .....                                                          | 210 |
| 10.2. Badania eksploatacyjne .....                                             | 210 |
| 10.2.1. Przyspieszenia klocka hamulcowego .....                                | 210 |
| 10.2.2. Pomiar hałasu .....                                                    | 211 |
| 11. ANALIZA WIDMOWA PRZYSPIESZEŃ PARY CIERNEJ KOŁO–<br>–KLOCEK HAMULCOWY ..... | 213 |
| 11.1. Drgania własne koła .....                                                | 215 |
| 11.2. Gęstość widmowa mocy przyspieszeń klocka.....                            | 216 |
| 11.3. Podsumowanie.....                                                        | 217 |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12. SYMULACJA KOMPUTEROWA ZUŻYCIA MODULOWANEGO<br>TARCIEM ZWROTNYM..... | 217 |
| 12.1. Analiza numeryczna ruchu klocka hamulcowego .....                 | 219 |
| 12.1.1. Program obliczeń .....                                          | 223 |
| 12.1.2. Wykresy fazowe.....                                             | 224 |
| 12.1.3. Wykresy zbiorcze.....                                           | 226 |
| 12.1.4. Podsumowanie .....                                              | 228 |
| 13. ZAKOŃCZENIE .....                                                   | 229 |
| Literatura .....                                                        | 231 |
| Streszczenie .....                                                      | 245 |
| Summary.....                                                            | 246 |
| Zusammenfassung .....                                                   | 247 |