

## 1. Wprowadzenie

|            |                                                    |    |
|------------|----------------------------------------------------|----|
| <b>1.1</b> | Krótką historia rozwoju silników spalinowych ..... | 10 |
|------------|----------------------------------------------------|----|

## 2. Klasyfikacja i podstawowe wskaźniki charakteryzujące pracę silników spalinowych

|            |                                                                     |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------|----|
| <b>2.1</b> | Klasyfikacja silników .....                                         | 16 |
| 2.1.1.     | Wprowadzenie .....                                                  | 16 |
| 2.1.2.     | Silniki o spalaniu wewnętrznym .....                                | 18 |
| 2.1.3.     | Silniki tłokowe .....                                               | 18 |
| 2.1.4.     | Rodzaje zapłonu mieszanki paliwowo-powietrznej .....                | 19 |
| 2.1.5.     | Cykl pracy silnika .....                                            | 19 |
| 2.1.6.     | Stopień doładowania .....                                           | 20 |
| 2.1.7.     | Układ konstrukcyjny silnika .....                                   | 20 |
| <b>2.2</b> | Obiegi silników spalinowych .....                                   | 22 |
| <b>2.3</b> | Zasada działania silnika czterosuwowego i silnika dwusuwowego ..... | 24 |
| <b>2.4</b> | Podstawowe wskaźniki pracy silnika .....                            | 28 |
| <b>2.5</b> | Podstawowe cechy konstrukcyjne silnika .....                        | 30 |
| <b>2.6</b> | Bilans energii silnika .....                                        | 32 |

## 3. Paliwa stosowane do zasilania silników

|            |                                                                     |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------|----|
| <b>3.1</b> | Wprowadzenie .....                                                  | 36 |
| <b>3.2</b> | Paliwa stosowane do zasilania silników o zapłonie iskrowym .....    | 37 |
| 3.2.1.     | Wprowadzenie .....                                                  | 37 |
| 3.2.2.     | Właściwości benzyn silnikowych .....                                | 38 |
| 3.2.3.     | Wpływ właściwości benzyn na osiągi silnika .....                    | 40 |
| <b>3.3</b> | Paliwa stosowane do zasilania silników o zapłonie samoczynnym ..... | 42 |
| 3.3.1.     | Wprowadzenie .....                                                  | 42 |
| 3.3.2.     | Olej napędowy i jego właściwości .....                              | 43 |
| 3.3.3.     | Wpływ właściwości oleju napędowego na osiągi silnika .....          | 44 |
| <b>3.4</b> | Estry metylowe kwasów tłuszczowych oleju rzepakowego .....          | 47 |
| <b>3.5</b> | Inne paliwa alternatywne .....                                      | 49 |
| 3.5.1.     | Wprowadzenie .....                                                  | 49 |
| 3.5.2.     | Etanol .....                                                        | 49 |
| 3.5.3.     | Metanol .....                                                       | 50 |
| 3.5.4.     | Biodimetyloeter .....                                               | 50 |
| 3.5.5.     | Mieszanki propanu i butanu (LPG) .....                              | 51 |

## 4. Tworzenie mieszanki palnej i proces spalania

|            |                                                     |    |
|------------|-----------------------------------------------------|----|
| <b>4.1</b> | Mieszanka paliwowo-powietrzna i jej parametry ..... | 56 |
| <b>4.2</b> | Wymiana ładunku .....                               | 59 |
| <b>4.3</b> | Zasilanie paliwem ciekłym .....                     | 61 |
| 4.3.1.     | Zasilanie benzyną .....                             | 61 |
| 4.3.2.     | Zasilanie olejem napędowym .....                    | 64 |
| 4.3.3.     | Zasilanie paliwami gazowymi .....                   | 65 |

|            |                                                                                               |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>4.4</b> | Tworzenie mieszanek palnych .....                                                             | 66 |
| <b>4.5</b> | Proces spalania w silniku o zapłonie iskrowym .....                                           | 68 |
| 4.5.1.     | Wprowadzenie .....                                                                            | 68 |
| 4.5.2.     | Przebieg spalania .....                                                                       | 69 |
| 4.5.3.     | Spalanie detonacyjne .....                                                                    | 70 |
| 4.5.4.     | Mieszanka jednorodna .....                                                                    | 71 |
| 4.5.5.     | Mieszanka niejednorodna .....                                                                 | 71 |
| 4.5.6.     | Mieszanka uwarstwiona .....                                                                   | 71 |
| <b>4.6</b> | Proces spalania w silniku o zapłonie samoczynnym .....                                        | 73 |
| <b>4.7</b> | Skład spalin .....                                                                            | 75 |
| <b>4.8</b> | Wpływ parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na osiągi silnika i na skład spalin ..... | 79 |

## 5. Podstawowe charakterystyki silników spalinowych

|            |                                                                   |     |
|------------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>5.1</b> | Rodzaje badań .....                                               | 84  |
| <b>5.2</b> | Warunki badań silników spalinowych .....                          | 86  |
| <b>5.3</b> | Stanowiska dynamometryczne .....                                  | 88  |
| <b>5.4</b> | Aparatura pomiarowa stosowana w badaniach laboratoryjnych .....   | 91  |
| <b>5.5</b> | Charakterystyka prędkościowa .....                                | 99  |
| <b>5.6</b> | Charakterystyka obciążeniowa .....                                | 105 |
| <b>5.7</b> | Charakterystyki regulacyjne .....                                 | 109 |
| 5.7.1.     | Wprowadzenie .....                                                | 109 |
| 5.7.2.     | Charakterystyka regulacyjna kąta wyprzedzenia zapłonu .....       | 109 |
| 5.7.3.     | Charakterystyka regulacyjna składu mieszanki .....                | 111 |
| <b>5.8</b> | Charakterystyka ogólna silnika .....                              | 114 |
| <b>5.9</b> | Charakterystyki układów zasilania .....                           | 116 |
| 5.9.1.     | Charakterystyka dawkowania pompy wtryskowej .....                 | 116 |
| 5.9.2.     | Charakterystyki elementów układu zasilania typu Common Rail ..... | 119 |

## 6. Układ korbowo-tłokowy

|            |                                                                           |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>6.1</b> | Ogólna budowa silnika .....                                               | 126 |
| <b>6.2</b> | Mechanika układu korbowo-tłokowego .....                                  | 128 |
| 6.2.1.     | Budowa układu korbowo-tłokowego i jego zadania .....                      | 128 |
| 6.2.2.     | Siły działające w układzie korbowo-tłokowym .....                         | 130 |
| 6.2.3.     | Wyrównoważenie silnika .....                                              | 136 |
| <b>6.3</b> | Konstrukcja układu korbowo-tłokowego .....                                | 138 |
| 6.3.1.     | Wprowadzenie .....                                                        | 138 |
| 6.3.2.     | Zespół kadłuba .....                                                      | 139 |
| 6.3.3.     | Tłok z pierścieniami .....                                                | 144 |
| 6.3.4.     | Korbowód .....                                                            | 146 |
| 6.3.5.     | Wał korbowy .....                                                         | 149 |
| <b>6.4</b> | Uszkodzenia układu tłokowo-korbowego – metody weryfikacji i naprawy ..... | 152 |
| <b>6.5</b> | Kierunki rozwoju układu korbowo-tłokowego .....                           | 157 |

## 7. Układ rozrządu

|            |                                                            |     |
|------------|------------------------------------------------------------|-----|
| <b>7.1</b> | Budowa układu rozrządu .....                               | 162 |
| 7.1.1.     | Wprowadzenie .....                                         | 162 |
| 7.1.2.     | Zawory .....                                               | 166 |
| 7.1.3.     | Gniazda zaworów .....                                      | 170 |
| 7.1.4.     | Sprężyny zaworów .....                                     | 171 |
| 7.1.5.     | Elementy mechanizmu napędu zaworów .....                   | 173 |
| 7.1.6.     | Wałek rozrządu .....                                       | 179 |
| 7.1.7.     | Rodzaje napędu wałka rozrządu .....                        | 182 |
| <b>7.2</b> | Układ zmiennych faz rozrządu .....                         | 186 |
| <b>7.3</b> | Zmienne wzniosy zaworów .....                              | 189 |
| <b>7.4</b> | Podstawowe uszkodzenia układu rozrządu i ich naprawa ..... | 191 |
| <b>7.5</b> | Kierunki rozwoju układu rozrządu .....                     | 195 |

## 8. Układy zasilania paliwem silników o zapłonie iskrowym

|             |                                                                                                               |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>8.1</b>  | Zadania układu zasilania paliwem .....                                                                        | 200 |
| <b>8.2</b>  | Rodzaje układów .....                                                                                         | 202 |
| <b>8.3</b>  | Budowa i działanie gaźnikowego układu zasilania paliwem .....                                                 | 204 |
| <b>8.4</b>  | Budowa i działanie układu pośredniego wtrysku benzyny .....                                                   | 209 |
| 8.4.1.      | Wprowadzenie .....                                                                                            | 209 |
| 8.4.2.      | Jednopunktowy wtrysk paliwa .....                                                                             | 211 |
| 8.4.3.      | Wielopunktowy wtrysk paliwa .....                                                                             | 213 |
| 8.4.4.      | Wtrysk ciągły sterowany mechanicznie .....                                                                    | 214 |
| 8.4.5.      | Wtrysk okresowy sterowany elektronicznie .....                                                                | 217 |
| 8.4.6.      | Ogólna budowa układu z elektronicznym wtryskiem paliwa<br>i jego działanie .....                              | 218 |
| <b>8.5</b>  | Układy bezpośredniego wtrysku benzyny .....                                                                   | 222 |
| <b>8.6</b>  | Podstawowe elementy układu zasilania paliwem silników<br>o zapłonie iskrowym .....                            | 229 |
| 8.6.1.      | Wprowadzenie .....                                                                                            | 229 |
| 8.6.2.      | Zbiornik paliwa .....                                                                                         | 229 |
| 8.6.3.      | Pompa paliwa zasilająca .....                                                                                 | 233 |
| 8.6.4.      | Wysokociśnieniowa pompa paliwa .....                                                                          | 237 |
| 8.6.5.      | Zasobnik paliwa .....                                                                                         | 239 |
| 8.6.6.      | Regulator ciśnienia paliwa .....                                                                              | 241 |
| 8.6.7.      | Wtryskiwacze paliwa .....                                                                                     | 243 |
| 8.6.8.      | Czujniki w systemach wtrysku benzyny .....                                                                    | 250 |
| <b>8.7</b>  | Parametry techniczne elementów układów zasilania paliwem silników o ZI ...                                    | 256 |
| <b>8.8</b>  | Elektroniczne sterowanie dawką paliwa .....                                                                   | 258 |
| 8.8.1.      | Wprowadzenie .....                                                                                            | 258 |
| 8.8.2.      | Dobór dawki paliwa – czasu wtrysku .....                                                                      | 259 |
| 8.8.3.      | Określanie bieżącego obciążenia silnika .....                                                                 | 259 |
| 8.8.4.      | Stabilizacja prędkości obrotowej biegu jałowego .....                                                         | 260 |
| <b>8.9</b>  | Podstawowe uszkodzenia elementów układu zasilania paliwem silników<br>o zapłonie iskrowym i ich naprawa ..... | 265 |
| <b>8.10</b> | Kierunki rozwoju układów zasilania paliwem silników o zapłonie iskrowym ...                                   | 268 |

**9. Układ zasilania paliwem silników o zapłonie samoczynnym**

|            |                                                                                                               |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>9.1</b> | Zadania układów zasilania paliwem i ich klasyfikacja .....                                                    | 278 |
| <b>9.2</b> | Budowa i działanie układu zasilania paliwem z mechanicznymi pompami wtryskowymi .....                         | 280 |
|            | 9.2.1. Układy z rzędową pompą wtryskową .....                                                                 | 280 |
|            | 9.2.2. Budowa i działanie układu zasilania paliwem z pompą rozdzielaczową .....                               | 293 |
| <b>9.3</b> | Budowa i działanie układu zasilania paliwem z pompowtryskiwaczami .....                                       | 304 |
| <b>9.4</b> | Budowa i działanie układu zasilania paliwem – Common Rail .....                                               | 310 |
|            | 9.4.1. Wprowadzenie .....                                                                                     | 310 |
|            | 9.4.2. Obwód niskiego ciśnienia .....                                                                         | 313 |
|            | 9.4.3. Obwód wysokiego ciśnienia .....                                                                        | 319 |
|            | 9.4.4. Pompa wysokiego ciśnienia .....                                                                        | 328 |
|            | 9.4.5. Elementy sterujące .....                                                                               | 332 |
| <b>9.5</b> | Podstawowe uszkodzenia elementów układu zasilania paliwem silników o zapłonie samoczynnym i ich naprawa ..... | 335 |
| <b>9.6</b> | Kierunki rozwoju układu zasilania paliwem silników o zapłonie samoczynnym .....                               | 337 |

**10. Układy zasilania paliwami gazowymi**

|             |                                                             |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------|-----|
| <b>10.1</b> | Rodzaje paliw gazowych .....                                | 342 |
| <b>10.2</b> | Rodzaje układów zasilania paliwami gazowymi .....           | 351 |
| <b>10.3</b> | Układy zasilania paliwem LPG .....                          | 352 |
|             | 10.3.1. Ogólna budowa i działanie układu LPG .....          | 352 |
|             | 10.3.2. Podstawowe elementy składowe układu LPG .....       | 353 |
|             | 10.3.3. Regulacja dawki paliwa i składu mieszanki LPG ..... | 366 |
| <b>10.4</b> | Układ zasilania paliwem CNG .....                           | 368 |
|             | 10.4.1. Ogólna budowa i działanie układu CNG .....          | 368 |
|             | 10.4.2. Podstawowe elementy składowe układu CNG .....       | 369 |
|             | 10.4.3. Regulacja dawki paliwa i składu mieszanki CNG ..... | 371 |

**11. Układ chłodzenia**

|             |                                                                                       |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>11.1</b> | Wprowadzenie .....                                                                    | 376 |
| <b>11.2</b> | Rodzaje układów chłodzenia .....                                                      | 378 |
| <b>11.3</b> | Budowa i działanie cieczowego układu chłodzenia .....                                 | 379 |
| <b>11.4</b> | Podstawowe elementy układu chłodzenia .....                                           | 381 |
|             | 11.4.1. Chłodnice .....                                                               | 381 |
|             | 11.4.2. Wentylatory .....                                                             | 383 |
|             | 11.4.3. Włączniki termiczne i czujniki temperatury .....                              | 391 |
|             | 11.4.4. Pompa cieczy chłodzącej .....                                                 | 392 |
|             | 11.4.5. Zbiornik wyrównawczy i zawór regulacji ciśnienia .....                        | 394 |
|             | 11.4.6. Termostaty .....                                                              | 396 |
| <b>11.5</b> | Filtry cieczy chłodzącej .....                                                        | 402 |
| <b>11.6</b> | Obiegi (schematy) układu chłodzenia .....                                             | 403 |
| <b>11.7</b> | Ciecze chłodzące .....                                                                | 408 |
| <b>11.8</b> | Podstawowe niesprawności eksploatacyjne układu chłodzenia i sposoby ich naprawy ..... | 411 |
| <b>11.9</b> | Kierunki rozwoju układów chłodzenia .....                                             | 415 |

## 12. Układ smarowania

|             |                                                                                                       |     |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>12.1</b> | Wprowadzenie .....                                                                                    | 420 |
| <b>12.2</b> | Ogólna budowa i działanie układu smarowania .....                                                     | 422 |
| <b>12.3</b> | Podstawowe elementy układu smarowania .....                                                           | 425 |
| 12.3.1.     | Pompa oleju i zawory przelewowe .....                                                                 | 425 |
| 12.3.2.     | Filtry oleju .....                                                                                    | 428 |
| 12.3.3.     | Chłodnica oleju .....                                                                                 | 431 |
| 12.3.4.     | Czujnik ciśnienia oleju .....                                                                         | 432 |
| 12.3.5.     | Czujnik stanu oleju .....                                                                             | 433 |
| <b>12.4</b> | Odpowietrzanie skrzyni korbowej .....                                                                 | 436 |
| <b>12.5</b> | Oleje i ich właściwości .....                                                                         | 438 |
| <b>12.6</b> | Klasyfikacje olejów silnikowych .....                                                                 | 441 |
| <b>12.7</b> | Podstawowe niesprawności eksploatacyjne układu smarowania<br>i sposoby naprawy elementów układu ..... | 449 |
| <b>12.8</b> | Kierunki rozwoju układu smarowania .....                                                              | 452 |

## 13. Układ zasilania powietrzem

|             |                                                                          |     |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>13.1</b> | Wprowadzenie .....                                                       | 458 |
| <b>13.2</b> | Budowa i elementy układu zasilania powietrzem .....                      | 464 |
| <b>13.3</b> | Układy doładowujące .....                                                | 468 |
| 13.3.1.     | Wprowadzenie .....                                                       | 468 |
| 13.3.2.     | Doładowanie bezsprężarkowe .....                                         | 469 |
| 13.3.3.     | Doładowanie mechaniczne .....                                            | 472 |
| 13.3.4.     | Doładowanie turbosprężarką .....                                         | 474 |
| 13.3.5.     | Doładowanie kombinowane .....                                            | 477 |
| <b>13.4</b> | Chłodzenie powietrza doładowywanego .....                                | 479 |
| <b>13.5</b> | Podstawowe niesprawności układu zasilania powietrzem i ich naprawa ..... | 481 |
| <b>13.6</b> | Kierunki rozwoju układu zasilania powietrzem .....                       | 483 |

## 14. Układy wylotowe spalin

|             |                                                                      |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>14.1</b> | Zadania układu wylotowego .....                                      | 490 |
| <b>14.2</b> | Budowa i klasyfikacja układów wylotowych .....                       | 491 |
| <b>14.3</b> | Katalizatory spalin i warunki ich pracy .....                        | 494 |
| 14.3.1.     | Wprowadzenie .....                                                   | 494 |
| 14.3.2.     | Katalizatory utleniające (dwufunkcyjne) .....                        | 494 |
| 14.3.3.     | Katalizatory trójfunkcyjne .....                                     | 496 |
| <b>14.4</b> | Katalizatory NO <sub>x</sub> .....                                   | 498 |
| <b>14.5</b> | Filtry cząstek stałych .....                                         | 500 |
| <b>14.6</b> | Systemy SCR .....                                                    | 508 |
| <b>14.7</b> | Recyrkulacja spalin .....                                            | 510 |
| <b>14.8</b> | Weryfikacja i naprawa podstawowych elementów układu wylotowego ..... | 512 |
| <b>14.9</b> | Kierunki rozwoju układów neutralizacji związków toksycznych .....    | 516 |

### 15. Układ zapłonowy

|         |                                                                         |     |
|---------|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| 15.1    | Zadania układu zapłonowego .....                                        | 522 |
| 15.2    | Rozwiązania konstrukcyjne układów zapłonowych .....                     | 526 |
| 15.2.1. | Rodzaje układów zapłonowych .....                                       | 526 |
| 15.2.2. | Układy z cewkami dwubiegunowymi .....                                   | 528 |
| 15.2.3. | Układy z jednobiegunowymi cewkami indywidualnymi .....                  | 530 |
| 15.2.4. | Układy z dwubiegunowymi cewkami indywidualnymi .....                    | 530 |
| 15.3    | Cewki zapłonowe .....                                                   | 533 |
| 15.4    | Przewody zapłonowe .....                                                | 537 |
| 15.5    | Świece zapłonowe .....                                                  | 540 |
| 15.6    | Regulacja przeciwdetonacyjna kąta zapłonu .....                         | 544 |
| 15.7    | Podstawowe niesprawności elementów układu zapłonowego i ich naprawa ... | 546 |
| 15.8    | Kierunki rozwoju układu zapłonowego .....                               | 550 |

### 16. Układ rozruchowy

|      |                                                                          |     |
|------|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 16.1 | Zadania układu rozruchowego .....                                        | 556 |
| 16.2 | Rodzaje układów rozruchowych .....                                       | 557 |
| 16.3 | Budowa i działanie elektrycznego układu rozruchowego .....               | 561 |
| 16.4 | Podstawowe niesprawności elementów układu rozruchowego i ich naprawa ... | 566 |
| 16.5 | Kierunki rozwoju układów rozruchowych .....                              | 570 |

### 17. Układy wspomagania rozruchu i nagrzewania silnika

|      |                                                                                  |     |
|------|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 17.1 | Zadania układu wspomagania rozruchu i nagrzewania silnika .....                  | 574 |
| 17.2 | Podgrzewacze rozruchowe .....                                                    | 576 |
| 17.3 | Świece płomieniowe .....                                                         | 580 |
| 17.4 | Świece żarowe .....                                                              | 583 |
| 17.5 | Elektryczne podgrzewacze powietrza dolotowego .....                              | 589 |
| 17.6 | Podstawowe niesprawności układu wspomagania rozruchu i nagrzewania silnika ..... | 590 |

### 18. Napędy alternatywne

|         |                                                                                      |     |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 18.1    | Wprowadzenie .....                                                                   | 596 |
| 18.2    | Napędy elektryczne .....                                                             | 598 |
| 18.3    | Napędy hybrydowe .....                                                               | 601 |
| 18.3.1. | Wprowadzenie .....                                                                   | 601 |
| 18.3.2. | Szeregowy napęd hybrydowy .....                                                      | 601 |
| 18.3.3. | Równoległy napęd hybrydowy .....                                                     | 602 |
| 18.3.4. | Szeregowo-równoległy napęd hybrydowy .....                                           | 604 |
| 18.3.5. | Bilans energetyczny pojazdu z napędem hybrydowym .....                               | 606 |
| 18.3.6. | Hybryda PHEV .....                                                                   | 609 |
| 18.3.7. | Źródła energii (ogniwo paliwowe) .....                                               | 609 |
| 18.3.8. | Odzyskiwanie energii hamowania (rekuperacja) .....                                   | 610 |
| 18.3.9. | Akumulatory energii (elektryczne, pneumatyczno-hydrauliczne i bezwładnościowe) ..... | 611 |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Wykaz podstawowych pojęć w językach polskim, angielskim i niemieckim ..... | 615 |
| Źródła ilustracji i fotografii .....                                       | 623 |