Spis treści

1. Wstęp **7**

2. Podstawowe definicje i jednostki z zakresu elektromagnetyzmu **9**

2.1. Odkrycie przez Oersted'a zjawiska pola magnetycznego towarzyszącego przepływowi prądu 10

2.2. Natężenia pola magnetycznego 11

2.3. Prawo Biota, Savarta i Laplace'a 14

2.4. Indukcja magnetyczna 16

2.5. Strumień indukcji magnetycznej 19

2.6. Siły elektrodynamiczne 21

2.7. Reguła Lenza, nazywana też regułą przekory 23

2.8. Pojęcia: indukcji elektromagnetycznej, samoindukcji i indukcyjność obwodu 24

2.9. Prawo Ohma dla obwodów magnetycznych 26

3. Napęd centralny i napęd zdecentralizowany **29**

3.1. Napęd centralny i decentralizacja napędu 30

3.2. Skutki decentralizacji napędu 32

4. Elektromagnesy prądu stałego **33**

4.1. Wynalezienie elektromagnesu 34

4.2. Wymagania stawiane współczesnym elektromagnesom 35

5. Budowa elektromagnesu **37**

5.1. Opis budowy elektromagnesu prądu stałego 38

5.2. Przykłady elektromagnesów prądu stałego 40

6. Zastosowania elektromagnesów **49**

6.1. Zastosowania elektromagnesów w przekaźnikach 50

6.2. Zastosowania elektromagnesów w budowie silników elektrycznych 51

6.3. Inne zastosowania elektromagnesów 54

6.4. Podsumowanie zastosowań elektromagnesów 56

7. Znamionowe warunki pracy elektromagnesów **57**

7.1. Napięcie znamionowe 58

7.2. Prąd znamionowy 58

7.3. Moc znamionowa 58

7.4. Względny czas zasilania ED 58

7.5. Skok zwory elektromagnesu ... 58
7.6. Siła elektromagnesu ... 59
7.7. Praca elektromagnesu ... 59
7.8. Znamionowa praca elektromagnesu ... 61
7.9. Warunki środowiskowe normalne ... 61
7.10. Wytrzymałość napięciowa izolacji ... 61
7.11. Temperatura graniczna elektromagnesu ... 62
7.12. Stopnie ochrony urządzeń elektrycznych ... 62

8. Wielkości mechaniczne opisujące działanie elektromagnesu ... 65

8.1. Siła elektromagnesu ... 66
8.2. Praca elektromagnesu ... 67

9. Modyfikacja mechanicznych charakterystyk statycznych elektromagnesów ... 69

9.1. Wpływ temperatury elektromagnesu i napięcia zasilania na przebieg mechanicznych charakterystyk statycznych ... 70
9.2. Wpływ modyfikacji kształtu zakończenia nurnika i jego stopy na przebieg mechanicznych charakterystyk statycznych elektromagnesu ... 70
9.3. Wpływ modyfikacji długości nurnika i jego stopy na przebieg mechanicznych charakterystyk statycznych elektromagnesu ... 75
9.4. Wpływ jednorodności pola magnetycznego na wartość siły przyciągania ... 77

10. Fazy działania układu elektromechanicznego napędzanego elektromagnesem ... 79

10.1. Przykład mechanizmu napędzanego elektromagnesem ... 80
10.2. Faza I – rozruch ... 81
10.3. Faza II – ruch roboczy obiektu ... 82
10.4. Faza III – wytracanie energii kinetycznej ... 85
10.5. Faza IV – spoczynek ... 86
10.6. Faza V – powrót ... 87
10.7. Faza VI – drgania ... 88
10.8. Pomiary czasów faz pracy układu elektromechanicznego ... 88

11. Bilans energii układu elektromechanicznego ... 91

11.1. Układ elektromechaniczny z elektromagnesem prądu stałego ... 92
11.2. Bilans energii układu elektromechanicznego ... 93

12. Sprawność napędowego układu elektromechanicznego i wpływ napięcia oraz czasu zasilania na sprawność ... 99

12.1. Definicja sprawności napędowego układu elektromechanicznego z elektromagnesem ... 100

12.2. Wpływ napięcia zasilania elektromagnesu prądu stałego na czas rozruchu i czas ruchu roboczego zwory ... 103

12.3. Granice wpływu napięcia zasilania na czas rozruchu i czas ruchu roboczego zwory ... 107

12.4. Stanowisko do badania sprawności przetwarzania energii przez elektromagnes ... 108

12.5. Przykładowe wyniki liczbowe wpływu napięcia zasilania na sprawność przetwarzania energii przez elektromagnes ... 110

12.6. Podsumowanie ... 112

13. Efektywność wykorzystania elektromagnesu ... 113

13.1. Wprowadzenie pojęcia efektywności wykorzystania elektromagnesu ... 114

13.2. Działania konstruktora napędu, mające na celu optymalizację efektywności ... 114

13.3. Wpływ parametrów konstrukcyjnych i napięcia zasilania na pracę elektromagnesu ... 120

13.4. Wybrane typowe przypadki zasilania i obciążenia elektromagnesu ... 123

13.5. Uwagi końcowe ... 125

14. Wpływ parametrów zasilania i obciążenia elektromagnesu na działanie układu elektromechanicznego ... 127

15. Dobór elektromagnesu do obciążenia ... 131

15.1. Przykład danych katalogowych elektromagnesu nurnikowego ... 132

15.2 Przykład doboru elektromagnesu ... 137

16. Opis matematyczny układu elektromechanicznego ... 141

16.1. Cele opisywania układów elektromechanicznych równaniami ... 142

16.2. Opis matematyczny układu elektromechanicznego ... 142

16.3. Typowe wykresy przebiegów zmienności wartości wielkości opisujących działanie układu elektromechanicznego ... 145

16.4 Obliczenia naprężeń i odkształceń elementów mechanizmu ... 145

17. Zależności cieplne ... 147

17.1. Skutki nagrzewania się elektromagnesu ... 148

17.2. Charakterystyki termiczne ... 155

18. Zjawiska towarzyszące wyłączaniu elektromagnesu ... 157

18.1. Zjawisko samoindukcji po wyłączeniu zasilania elektromagnesu ... 158

18.2. Metody ograniczania napięcia samoindukcji i systemy gaszenia przepięć ... 159

18.3. Wpływ układów gaszących przepięcia na czas rozpraszania zakumulowanej energii pola magnetycznego ... 161

19. Metody wyznaczania mechanicznych charakterystyk statycznych elektromagnesów ... 163

19.1. Mechaniczne charakterystyki statyczne ... 164

19.2. Metoda i urządzenia do badania charakterystyk mechanicznych elektromagnesów o *ED* w zakresie od 1% do 0,1% ... 165

19.3. Urządzenie do automatycznego wyznaczania statycznych charakterystyk mechanicznych elektromagnesów nurnikowych ... 171

19.4. Metoda badania statycznych charakterystyk mechanicznych elektromagnesów o *ED* poniżej 0,1% ... 175

19.5. Obrazowanie charakterystyk statycznych ... 177

20. Metody wyznaczania mechanicznych charakterystyk dynamicznych układów napędzanych elektromagnesami prądu stałego ... 181

20.1. Problematyka badania mechanicznych charakterystyk dynamicznych ... 182

20.2. Metody pośrednie badania charakterystyk dynamicznych ... 183

20.2.1. Metoda Gridina ... 183

20.2.2. Badania dynamiki elektromagnesu z zastosowaniem metod bazujących na charakterystyce strumienia skojarzonego ... 183

20.2.3. Metoda doświadczalno-wykreślna ... 185

20.3. Program komputerowy do wyznaczania mechanicznych charakterystyk dynamicznych napędu z elektromagnesem ... 186

20.3.1. Utylitarne skutki działania programu ... 186

20.3.2. Krótka charakterystyka programu ... 189

20.4. Metoda bezpośrednia ... 192

20.4.1. Zasada pomiarów szybkozmiennej siły ... 192

20.4.2. Wyznaczanie przebiegów zmienności prądu i napięcia zasilania ... 196

20.4.3. Badanie ruchu zwory ... 198

21. Uproszczone obliczenia elektromagnesu ... 201

21.1. Obliczenia magnetowodu ... 202

21.2. Obliczenia uzwojeń ... 206

Bibliografia i źródła internetowe ... 211