

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

RYSZARD SIKORA
TOMASZ CHADY
PRZEMYSŁAW ŁOPATO
GRZEGORZ PSUJ

Elektrotechnika teoretyczna

Szczecin 2016

Spis treści

Spis najważniejszych oznaczeń	7
Przedmowa	11
1. Wstęp	13
2. Podstawowe wiadomości	15
2.1. Podstawowe prawa elektrotechniki	15
2.2. Środowisko	17
2.3. Wielkości fizyczne, układy jednostek	19
2.4. Analiza wymiarowa	20
2.5. Rzeczywistość i jej model	25
3. Elementy obwodów prądu stałego	31
3.1. Wprowadzenie	31
3.2. Niesterowane elementy obwodów	31
3.3. Idealne źródła energii	35
3.4. Charakterystyki napięciowo-prądowe, elementy nieliniowe	36
3.5. Sterowane elementy obwodów	40
4. Obliczanie obwodów prądu stałego	45
4.1. Struktura obwodów	45
4.2. Prawa Kirchhoffa i prawo Ohma	47
4.3. Proste połączenia elementów	48
4.4. Złożone połączenia elementów pasywnych	54
4.5. Złożone połączenie elementów aktywnych	56
4.6. Wykorzystanie praw Kirchhoffa do analizy obwodów elektrycznych	58
4.7. Wykorzystanie zasady superpozycji do analizy obwodów elektrycznych	61
4.8. Metoda oczkowa	63
4.9. Metoda węzłowa	67
4.10. Zasada kompensacji i zasada podstawiania	72
4.11. Zasada wzajemności	76
4.12. Twierdzenie o generatorze zastępczym	78
4.13. Tory elektryczne	81
4.14. Praca toru dwuprzewodowego, dopasowanie energetyczne	83
4.15. Obliczanie torów elektrycznych	86
4.16. Bilans mocy	90
4.17. Obwody zawierające elementy nieliniowe	93
5. Obwody magnetyczne	95
6. Obwody prądu sinusoidalnie zmiennego	103
6.1. Wprowadzenie	103
6.2. Proste obwody prądu sinusoidalnie zmiennego	106
6.3. Wartość skuteczna i wartości średnie	109
6.4. Szeregowy obwód RLC	113
6.5. Szeregowy obwód RL oraz RC	117
6.6. Równoległe połączenie G, L, C	122
6.7. Moc chwilowa i moc czynna	129
6.8. Moc bierna i pozorna, równoważność energetyczna	133
6.9. Bilans mocy w obwodach	136

6.10.	Rezonans w obwodach	137
6.11.	Podstawy metody symbolicznej	143
6.12.	Prawa obwodów elektrycznych wyrażone w postaci symbolicznej	147
6.13.	Elementarne wiadomości na temat liczb i funkcji zespolonych	150
6.14.	Rezonans w złożonych obwodach elektrycznych	153
6.15.	Moc w metodzie symbolicznej	158
6.16.	Rzeczywista cewka i rzeczywisty kondensator	159
6.17.	Kompensacja mocy biernej	164
6.18.	Spadek i strata napięcia	165
6.19.	Dopasowanie odbiornika do źródła	169
6.20.	Obwody, w których występuje sprzężenie indukcyjne	171
6.21.	Zwojność cewek	172
6.22.	Sprzężenie indukcyjne w obwodach szeregowym i równoległym	174
6.23.	Sprzężenie indukcyjne w złożonych obwodach	178
6.24.	Transformator powietrzny	180
6.25.	Impedancja wejściowa transformatora powietrznego	184
6.26.	Cewka nawinięta na rdzeń ferromagnetyczny	185
6.27.	Wpływ nieliniowości krzywej magnesowania na przebiegi prądu i napięcia	190
6.28.	Transformator z rdzeniem ferromagnetycznym	193
6.29.	Transformator idealny	198
6.30.	Stan jałowy i stan zwarcia transformatora	201
6.31.	Transformatory pomiarowe	203
6.32.	Autotransformator	205
6.33.	Charakterystyki szeregowego obwodu RLC	206
6.34.	Charakterystyki częstotliwościowe równoległego obwodu GLC	212
6.35.	Charakterystyki szeregowego i równoległego obwodu RLC przy wymuszeniu prądowym	215
6.36.	Rozstrojenie bezwzględne i względne	216
6.37.	Układy reaktancyjne	219
7.	Stany nieustalone w liniowych obwodach elektrycznych o stałych rozłożonych	229
7.1.	Wprowadzenie	229
7.2.	Szeregowy obwód RL załączony na napięcie stałe	232
7.3.	Szeregowy obwód RC załączony na napięcie stałe	238
7.4.	Szeregowy obwód RLC załączony na napięcie stałe	245
7.5.	Szeregowy obwód RL załączony na napięcie sinusoidalnie zmienne	252
7.6.	Szeregowy obwód RC załączony na napięcie sinusoidalnie zmienne	256
7.7.	Podstawy operatorowej metody obliczania stanów nieustalonych	259
7.8.	Właściwości przekształcenia Laplace'a	260
7.9.	Podstawowe twierdzenia rachunku operatorowego	262
7.10.	Transformaty	267
7.11.	Wzory Heaviside'a	270
7.12.	Metoda operatorowo-symboliczna	273
7.13.	Prawa obwodów w postaci operatorowej	274
7.14.	Metoda dwóch przeciwnych stanów	277
7.15.	Przykłady zastosowań metody operatorowej	278
8.	Czworniki	283
8.1.	Wprowadzenie	283
8.2.	Uzupełniające wiadomości o dwójnikach liniowych	285
8.3.	Łańcuchowe równania czworników	287
8.4.	Macierz łańcuchowa czwornika wzajemnego	289
8.5.	Macierz łańcuchowa czwornika symetrycznego	290

8.6.	Łańcuchowe równanie czwórnika, gdy strzałka prądu wyjściowego skierowana jest do odbiornika	291
8.7.	Schematy zastępcze czwórników wzajemnych	292
8.8.	Parametry czwórników symetrycznych	293
8.9.	Pozostałe równania (macierze) czwórników	295
8.10.	Podsumowanie wiadomości o równaniach (macierzach) czwórników	298
8.11.	Elementy macierzy czwórników	299
8.12.	Czwórnik niepodlegające regule wzajemności	300
8.13.	Wzmacniacz operacyjny i nulor	302
8.14.	Konwertory	305
8.15.	Inwertory	309
8.16.	Uzupełniające wiadomości o konwertorach oraz inwertorach	311
8.17.	Łańcuchowe połączenie czwórników	315
8.18.	Równoległe i szeregowe połączenie czwórników	316
8.19.	Hybrydowe połączenie czwórników	320
8.20.	Uzupełniające wiadomości o połączeniach czwórników	322
9.	Obwody trójfazowe	325
9.1.	Wprowadzenie	325
9.2.	Trójfazowe obwody symetryczne skojarzone w gwiazdę	327
9.3.	Trójfazowe obwody symetryczne skojarzone w trójkąt	331
9.4.	Niesymetryczne obwody trójfazowe	336
9.5.	Moce w trójfazowych obwodach symetrycznych	341
9.6.	Moc w obwodach trójfazowych niesymetrycznych	343
9.7.	Spadek i strata napięcia w obwodach trójfazowych	346
9.8.	Kompensacja mocy biernej w obwodach trójfazowych	347
9.9.	Pole magnetyczne zmienne w czasie i przestrzeni	349
9.10.	Pole wirujące i biegnące	349
10.	Składowe symetryczne	355
10.1.	Wprowadzenie	355
10.2.	Zamiana generatorów niesymetrycznych na generatory składowych symetrycznych	357
10.3.	Uogólnienie pojęcia symetrii odbiornika trójfazowego	361
10.4.	Podstawowe prawa obwodów dla składowych symetrycznych	363
10.5.	Zwarcie jednofazowe z ziemią	367
10.6.	Zwarcie dwufazowe	371
10.7.	Zwarcie dwufazowe z ziemią	373
10.8.	Przykład zwarcia jednofazowego z ziemią	375
10.9.	Filtry składowych symetrycznych	375
11.	Przebiegi niesinusoidalne (stany ustalone w obwodach z elementami skupionymi przy wymuszeniu niesinusoidalnym)	379
11.1.	Wprowadzenie	379
11.2.	Aproksymacja przebiegów za pomocą szeregów Fouriera	381
11.3.	Wartość skuteczna przebiegów odkształconych	384
11.4.	Obliczanie rozptywu prądów i rozkładu napięć	385
11.5.	Określenie mocy pobieranych przez obwody zasilane odkształconym napięciem ..	388
11.6.	Współczynnik mocy	392
11.7.	Kompensacja mocy biernej	395
11.8.	Przebiegi odkształcone w obwodach trójfazowych	396
11.9.	Uzupełniające wiadomości o napięciach i prądach odkształconych	401
11.10.	Wyznaczanie współczynników szeregu Fouriera	404
11.11.	Zespolona postać szeregu Fouriera	409
11.12.	Widmo przebiegów nieokresowych	414

11.13. Właściwości przekształcenia Fouriera	417
11.14. Wykorzystanie przekształcenia Fouriera do analizy przebiegów nieustalonych	420
12. Zadania	423
12.1. Obwody prądu stałego	423
12.2. Jednofazowe obwody prądu zmiennego w stanie ustalonym	438
12.3. Trójfazowe obwody prądu zmiennego w stanie ustalonym	453
12.4. Obwody prądu zmiennego w stanie nieustalonym	467
Literatura	479

- d) środowiskiem nieliniowym nazywamy takie środowisko, którego właściwości są funkcją działającej wielkości fizycznej;
- e) środowiskiem izotropowym nazywamy takie środowisko, którego właściwości nie zależą od kierunku i zwrotu działania wielkości fizycznej;
- f) środowiskiem anizotropowym nazywamy środowisko, którego właściwości zależą od kierunku i zwrotu działania wielkości fizycznej;
- g) środowiskiem parametrycznym nazywamy środowisko, którego właściwości są funkcją czasu.

Nie określa się dodatkową nazwą środowiska, którego właściwości nie są funkcją czasu.

Określimy teraz krańcowe przypadki środowisk. Najbardziej skomplikowanym środowiskiem jest środowisko parametryczne, nieliniowe, anizotropowe, niejednorodne, a najmniej – środowisko izotropowe, liniowe, jednorodne.

Dla dokładniejszego wyjaśnienia podanych określeń rozpatrzmy kilka przykładów. Wyobraźmy sobie przewód wykonany z miedzi o identycznych właściwościach w całej objętości. Taki przewód ma w każdym punkcie identyczną konduktywność γ i dla przepływającego prądu jest środowiskiem jednorodnym. Założmy dodatkowo, że przewód jest bardzo dobrze chłodzony, tzn. że temperatura jego powierzchni jest stała i nie zależy od przepływającego prądu. Wewnątrz przewodu większy prąd wydziela więcej ciepła, większa ilość ciepła powoduje większy spadek temperatury, przepływając z wnętrza do powierzchni przewodu. Przy stałej temperaturze powierzchni przewodu wraz ze wzrostem prądu rośnie temperatura jego wnętrza. Wraz ze wzrostem temperatury przewodu maleje jego konduktywność γ . Z przeprowadzonych rozważań wynika, że przewód wykonany z jednorodnej miedzi jest dla prądu środowiskiem jednorodnym nieliniowym. Tak jest, gdy temperatura przewodów nie jest identyczna we wszystkich jego punktach.

Rozważmy teraz powyższy przykład z dwoma dodatkowymi ograniczeniami. Założmy, że:

- a) prąd zmienia się w wąskim zakresie, np. o $\pm 10\%$,
- b) przewód jest cienki.

W przypadku rozpatrywanego przykładu będziemy mówić o przewodzie, że jest on cienki wtedy, gdy spadek temperatury w przewodzie, spowodowany przepływem ciepła z jego wnętrza do powierzchni zewnętrznej, jest mały, np. wynosi do 10% temperatury powierzchni zewnętrznej t_0 . Pokazano to na rys. 2.1a i b, gdzie:

- a) t_0 – temperatura powierzchni zewnętrznej,
- b) t_m – temperatura maksymalna (środką przewodu),
- c) Q – ciepło wydzielone wewnątrz przewodu,
- d) \rightarrow – pojedyncza strzałka wskazuje na kierunek przepływu prądu I ,
- e) $\leftarrow \rightarrow$ – strzałki skierowane do zewnętrznej powierzchni przewodu wskazują kierunek przepływu ciepła.

Powyższe założenia powodują, że można z dużą dokładnością przyjąć stałą temperaturę wewnątrz przewodu, a stąd wynika przecież stałość i niezmienność konduktywności γ . W rozpatrywanym przypadku przewód jest środowiskiem jednorodnym i liniowym dla przepływającego prądu.