

## SPIS TREŚCI

Przedmowa . . . . .		3
<b>Rozdział I. Budowa rdzenia</b>		
1. Blachy . . . . .		5
2. Przekrój kolumn i jarzm . . . . .		7
A. Przekrój kolumny . . . . .		7
B. Przekrój jarzma . . . . .		10
3. Składanie rdzenia . . . . .		10
A. Sposoby składania rdzenia . . . . .		10
B. Rdzeń zaplatany . . . . .		11
C. Rdzeń strugany . . . . .		15
4. Mocowanie kolumn i jarzm . . . . .		16
A. Mocowanie kolumn . . . . .		16
B. Mocowanie jarzm . . . . .		18
5. Konstrukcje specjalne . . . . .		19
A. Rdzeń pakietowany promieniowo . . . . .		19
B. Rdzenie z blachy walcowanej na zimno, o małej stratności . . . . .		20
<b>Rozdział II. Budowa uzwojeń</b>		
1. Typy uzwojeń . . . . .		22
2. Uzwojenia cylindryczne . . . . .		22
A. Uzwojenia niskiego napięcia transformatorów małych i średnich mocy . . . . .		22
B. Uzwojenia śrubowe . . . . .		25
C. Uzwojenia cewkowe z drutu okrągłego . . . . .		28
D. Uzwojenia blokowe . . . . .		31
E. Cewki krążkowe z drutu profilowego . . . . .		32
F. Uzwojenia wywrotkowe . . . . .		33
G. Zaczepy . . . . .		35
H. Uzwojenia w transformatorze z regulacją napięcia pod obciążeniem . . . . .		39
3. Uzwojenia krążkowe . . . . .		43
<b>Rozdział III. Przepięcia i wytrzymałość dielektryczna</b>		
1. Robocze naprężenia izolacji transformatora . . . . .		45
2. Rodzaje przepięć . . . . .		46
3. Przepięcia łączeniowe . . . . .		46
A. Podział przepięć łączeniowych . . . . .		46
B. Odłączanie nie obciążonej linii napowietrznej od transformatora . . . . .		47
C. Załączanie i odłączanie transformatora od źródła napięcia . . . . .		49
D. Zwarcie z ziemią jednej fazy uzwojenia transformatora . . . . .		49
E. Wnioski dotyczące przepięć łączeniowych . . . . .		50
4. Przepięcia atmosferyczne . . . . .		50
A. Istota zjawiska . . . . .		50
B. Analityczny dowód falowego charakteru przepięć atmosferycznych . . . . .		51
C. Początkowy rozkład napięcia w uzwojeniu transformatora . . . . .		54
a. Określenie kształtu udaru . . . . .		54
b. Schemat zastępczy uzwojeń jako podstawa do określenia początkowego rozkładu napięcia . . . . .		55
c. Analiza matematyczna początkowego rozkładu napięcia i gradientu napięcia . . . . .		55

D. Warunki uzyskania prostoliniowego początkowego rozkładu napięcia	59
E. Końcowy (ustalony) rozkład napięcia w uzwojeniach transformatora	60
F. Stan nieustalony między początkowym a końcowym rozkładem napięcia	61
a. Istota zjawiska	61
b. Analiza matematyczna drgań napięcia w uzwojeniu w przypadku udaru prostokątnego	62
c. Przypadek udaru nieprostokątnego i udaru uciętego	68
G. Zjawiska przepięciowe w uzwojeniu wtórnym	69
5. Zasady konstrukcyjne wynikające z teorii przepięć	72
A. Ogólne wytyczne doboru izolacji	72
B. Wzmacnianie izolacji zwojów skrajnych	73
C. Sposoby uzyskania równomiernego rozkładu gradientu napięcia wzdłuż uzwojenia	74
a. Pierścienie pojemnościowe	74
b. Uzwojenia warstwowe	75
c. Uzwojenia ekranowane	76
d. Uzwojenia przeplatane	76
6. Próby dielektryczne	77
A. Omówienie ogólne	77
B. Próba napięciem obcym	77
C. Próba wzmożonym napięciem własnym	80
D. Próba udarowa	80
7. Obliczanie wytrzymałości udarowej izolacji uzwojeń	83
A. Praktyczne znaczenie obliczeń	83
B. Obliczanie pojemności wewnętrznych transformatora	84
C. Obliczanie napięć i różnic napięć w uzwojeniach	86
a. Obliczanie różnic napięcia przy początkowym rozkładzie napięcia	86
b. Obliczanie maksymalnych wartości napięć metodą Frida	87
8. Przykład liczbowy	90
a. Dane transformatora	90
b. Obliczanie pojemności względem ziemi	90
c. Obliczanie pojemności międzycewkowej	91
d. Obliczanie początkowego rozkładu napięcia	92
e. Obliczanie naprężeń dielektrycznych na podstawie początkowego rozkładu napięcia	92
f. Obliczanie rozkładu napięcia metodą Frida	93

#### Rozdział IV. Materiały i układy izolacyjne

1. Zależności ogólne	95
A. Rys historyczny	95
B. Najważniejsze własności materiałów izolacyjnych	95
a. Zależność wytrzymałości dielektrycznej od grubości materiału	95
b. Zależność wytrzymałości dielektrycznej od czasu trwania naprężenia elektrycznego	96
c. Zależność wytrzymałości dielektrycznej od temperatury	97
C. Wpływ wylądowań powierzchniowych na własności materiałów izolacyjnych	97
D. Wpływ uwarstwienia materiału izolacyjnego na wytrzymałość dielektryczną	98
E. Wpływ zanieczyszczeń i wilgoci na własności materiałów izolacyjnych	98
2. Przegląd materiałów izolacyjnych i półfabrykatów, stosowanych przy budowie transformatorów	98
A. Zestawienie materiałów izolacyjnych	98
B. Bawełna	99
C. Papier	99
D. Preszpan	101
E. Tektura transformatorowa specjalna	101

F. Tuleje izolacyjne . . . . .	101
a. Rodzaje tulei . . . . .	101
b. Tuleje Szttywne (twarde) . . . . .	101
c. Tuleje preszpanowe (półtwarde) . . . . .	104
d. Tuleje miękkie . . . . .	104
G. Pierścienie kątowe i przegrody międzyfazowe . . . . .	105
H. Drewno . . . . .	108
J. Olej transformatorowy . . . . .	108
K. Izolacyjne płyny syntetyczne . . . . .	111
L. Inne materiały izolacyjne . . . . .	112
3. Układy izolacyjne . . . . .	112
A. Izolacja główna . . . . .	112
a. Izolacja klasyczna . . . . .	113
b. Izolacja miękka . . . . .	116
c. Izolacja końcowa . . . . .	117
B. Izolacja międzyfazowa . . . . .	119
C. Odstępny izolacyjne spotykane w praktyce . . . . .	119

### Rozdział V. Przepusty

1. Obliczanie przepustów . . . . .	122
A. Wymagania dotyczące przepustów . . . . .	122
B. Wytyczne obliczeniowe . . . . .	123
a. Część napowietrzna . . . . .	123
b. Część zanurzona w oleju . . . . .	124
c. Izolacja główna przepustu . . . . .	125
C. Sprawdzenie konstrukcji przepustu pod względem cieplnym . . . . .	126
2. Typowe konstrukcje przepustów transformatorowych . . . . .	127
A. Przepusty na napięcia niskie i średnie . . . . .	127
B. Przepusty na napięcia bardzo wysokie . . . . .	130
a. Przepust wielorurowy . . . . .	130
b. Przepust olejowy . . . . .	130
c. Przepust kondensatorowy . . . . .	131
C. Część prąd wiodąca przepustu . . . . .	132
3. Mocowanie przepustów . . . . .	133

### Rozdział VI. Części konstrukcyjne transformatorów

1. Konstrukcje prasujące i nośne transformatora . . . . .	136
A. Rola konstrukcji prasującej . . . . .	136
B. Konstrukcje prasujące uzwojenia . . . . .	136
C. Konstrukcje nośne transformatorów . . . . .	142
2. Budowa i obliczanie belek jarzmowych . . . . .	144
A. Kształt belek jarzmowych . . . . .	144
B. Kanały chłodzące przy belkach jarzmowych . . . . .	147
C. Izolacja śrub jarzmowych . . . . .	147
D. Obliczanie belek i śrub na działanie sił prasujących jarzma . . . . .	148
E. Obliczanie belek jarzmowych na działanie sił przy podnoszeniu rdzenia . . . . .	149
F. Obliczanie belek jarzmowych na działanie sił elektrodynamicznych . . . . .	151
G. Obliczanie konstrukcji spawanych belek jarzmowych dużych transformatorów . . . . .	153
H. Obliczanie górnych belek jarzmowych i pierścienia prasującego przy zastosowaniu śrub sychowych . . . . .	156
3. Kadzie transformatorowe . . . . .	158
A. Rodzaje kadzi transformatorowych . . . . .	158
B. Ustalenie wewnętrznych wymiarów kadzi . . . . .	159
C. Kadzie z blachy gładkiej . . . . .	160
D. Kadzie z blachy falistej . . . . .	161
E. Kadzie rurowe . . . . .	162
F. Kadzie radiatorowe . . . . .	164
G. Obliczanie płaskich części kadzi transformatorowych . . . . .	166

H. Części związane z kadzią . . . . .	169
a. Rama górna . . . . .	169
b. Pokrywa . . . . .	169
c. Dno . . . . .	170
d. Podwozie przyspawane do dna . . . . .	172
e. Podwozie odejmowalne . . . . .	173
f. Konserwator . . . . .	175

### Rozdział VII. Wyposażenie transformatorów

1. Przekaznik gazowo-podmuchowy . . . . .	178
2. Rura wydechowa . . . . .	179
3. Wskaźniki temperatury . . . . .	180
4. Przełączniki zacsepów . . . . .	181
A. Przełączniki zacsepów do regulacji w stanie bez napięciowym . . . . .	181
B. Przełączniki zacsepów do regulacji pod obciążeniem . . . . .	183
a. Podział przełączników . . . . .	183
b. Przełączniki fazowe . . . . .	183
c. Przełączniki zerowe . . . . .	184
d. Oporniki i dławiki przełączników . . . . .	185
e. Napęd przełącznika zacsepów . . . . .	186

### Rozdział VIII. Montaż i suszenie

1. Montaż . . . . .	188
A. Czynności podczas montażu transformatora . . . . .	188
B. Przygotowanie uzwojeń do montażu . . . . .	188
C. Przebieg montażu uzwojeń . . . . .	189
a. Uzwojenia z tulejami izolacyjnymi . . . . .	189
b. Uzwojenia z izolacją miękką . . . . .	190
2. Suszenie . . . . .	191
A. Cel suszenia . . . . .	191
B. Suszenie w suszarni powietrznej . . . . .	191
C. Suszenie w suszarni próżniowej . . . . .	191
D. Czynności po skończonym suszeniu . . . . .	194
E. Przechowywanie wysuszonego transformatora bez oleju . . . . .	195

### Rozdział IX. Grzanie się i chłodzenie transformatorów

1. Starzenie się izolacji . . . . .	196
2. Grzanie się transformatora jako zagadnienie konstrukcyjne . . . . .	199
3. Rodzaje chłodzenia transformatorów . . . . .	200
4. Sposoby przenoszenia ciepła . . . . .	201
A. Przewodnictwo . . . . .	201
a. Ciało jest tylko przewodnikiem ciepła . . . . .	202
b. Ciało jest jednocześnie źródłem ciepła . . . . .	203
B. Konwekcja . . . . .	204
a. Oddawanie ciepła za pośrednictwem powietrza . . . . .	204
b. Oddawanie ciepła za pośrednictwem oleju . . . . .	205
C. Promieniowanie . . . . .	206
5. Przyrosty temperatury w transformatorze olejowym . . . . .	208
6. Przyrost temperatury uzwojeń w stosunku do oleju . . . . .	208
A. Cewka cylindryczna dwustronnie chłodzona, bez kanałów promieniowych o zewnętrznych powierzchniach bez specjalnej warstwy izolacyjnej . . . . .	209
a. Cewki z drutu profilowego jedno- i dwuwarstwowe — każdy drut styka się przynajmniej jednym bokiem z olejem . . . . .	209
b. Cewki wielowarstwowe . . . . .	210
B. Cewka cylindryczna dwustronnie chłodzona, bez kanałów promieniowych z dodatkową izolacją obu powierzchni cylindrycznych . . . . .	211
C. Uzwojenie składające się z pojedynczych cewek wielowarstwowych oddzielonych promieniowymi kanałami chłodzącymi . . . . .	215

D. Uzwojenie z cewek płaskich oddzielonych promieniowymi kanałami chłodzącymi o przewodach stykających się z olejem przynajmniej dwoma bokami . . . . .	217
7. Dopuszczalne przyrosty temperatury uzwojenia w stosunku do oleju i otoczenia . . . . .	218
8. Przyrost temperatury rdzenia w stosunku do oleju . . . . .	220
9. Ustalanie się temperatury transformatora . . . . .	222
10. Stała czasu uzwojeń . . . . .	223
11. Stała czasu transformatora jako całości . . . . .	224
12. Obliczenie ciepłne kadzi olejowej przy chłodzeniu naturalnym . . . . .	225
A. Wytyczne do obliczeń . . . . .	225
B. Kadź o ściankach gładkich . . . . .	226
C. Kadź z blachy falistej . . . . .	227
D. Kadź rurowa . . . . .	229
E. Kadź radiatorowa . . . . .	230
13. Chłodzenie ze sztucznym podmuchem . . . . .	233
14. Chłodzenie ze sztucznym obiegiem oleju i oddzielną chłodnicą . . . . .	235
A. Wymagania w stosunku do pompy obiegowej . . . . .	236
B. Chłodnice wodne . . . . .	236
C. Chłodnice powietrzne . . . . .	238
15. Porównanie systemów chłodzenia . . . . .	239

#### Rozdział X. Stany ciepłne niestabilne

1. Pojęcie mocy transformatora z punktu widzenia ciepłnego . . . . .	241
2. Grzanie się transformatora przy zmianach obciążenia . . . . .	242
3. Starzenie się izolacji transformatora . . . . .	246
4. Obciążenie transformatora w obniżonej temperaturze otoczenia . . . . .	249
5. Dopuszczalne obciążenie po uprzednim niedociążeniu . . . . .	250
6. Obciążenie zależne od przebiegu dobowej krzywej zapotrzebowania mocy . . . . .	251
7. Przeciążenia zakłóceniewe . . . . .	252
8. Zwarcie ruchowe . . . . .	254

#### Rozdział XI. Obliczanie transformatora

1. Uwagi ogólne . . . . .	258
2. Obliczanie obwodu magnetycznego . . . . .	259
A. Obliczanie przekroju kolumny . . . . .	260
a. Obliczanie średnicy kolumny przy pomocy wzoru Kehsego . . . . .	260
b. Obliczanie średnicy i przekroju kolumny na podstawie napięcia zwojowego oraz dopuszczalnej indukcji . . . . .	260
c. Obliczanie przekroju kolumny przy pomocy wzoru Richtera . . . . .	261
B. Obliczanie przekroju jarzma . . . . .	262
C. Obliczanie wysokości kolumny . . . . .	262
D. Odstęp między osiami kolumn i długość jarzma . . . . .	263
E. Obliczanie strat w żelazie . . . . .	266
3. Obliczanie obwodu elektrycznego . . . . .	266
A. Ustalenie liczby zwojów . . . . .	267
B. Obliczanie przekrojów przewodów . . . . .	267
a. Połączenie uzwojeń w gwiazdę lub trójkąt . . . . .	268
b. Połączenie uzwojenia dolnego napięcia w zygzak . . . . .	268
C. Ukształtowanie uzwojeń . . . . .	270
D. Izolacja przewodów . . . . .	272
4. Sprawdzenie wyników obliczeń . . . . .	273
5. Obliczanie na gospodarność . . . . .	273
6. Sprawdzanie mechanicznej wytrzymałości uzwojeń . . . . .	282
A. Uwagi ogólne . . . . .	282
B. Siły promieniowe . . . . .	283
C. Siły osiowe . . . . .	284

## Rozdział XII

Przykłady obliczeń . . . . .	288
------------------------------	-----

## Rozdział XIII. Badanie transformatorów

1. Pomiar przekładni . . . . .	351
A. Definicje i dopuszczalne odchyłki . . . . .	351
B. Pomiar bezpośredni . . . . .	352
a. Uchyb powodowany prądem stanu jałowego . . . . .	352
b. Uchyb powodowany prądem woltomierza . . . . .	352
c. Uchyby przyrządów pomiarowych . . . . .	353
d. Uchyb powodowany niesymetrią napięcia . . . . .	354
C. Metoda porównawcza . . . . .	355
D. Metoda kompensacyjna . . . . .	355
E. Wstępny pomiar przekładni . . . . .	357
2. Kierunek nawinięcia uzwojeń . . . . .	357
3. Wyznaczenie grupy układów połączeń w transformatorach trójfazowych . . . . .	357
A. Wyznaczenie grupy połączeń przy pomocy prądu zmiennego . . . . .	357
B. Wyznaczenie grupy połączeń przy pomocy prądu stałego . . . . .	358
4. Próba stanu jałowego . . . . .	362
A. Technika pomiaru . . . . .	362
B. Straty mocy w stanie jałowym . . . . .	364
C. Pomiar wstępny . . . . .	366
5. Pomiar oporności uzwojeń . . . . .	367
6. Próba stanu zwarcia . . . . .	367
A. Technika pomiaru . . . . .	367
B. Przeliczanie wyników . . . . .	368
C. Próba zwarcia transformatora trójuzwojeniowego . . . . .	370
D. Próba zwarcia autotransformatora . . . . .	370
E. Dopuszczalne odchyłki . . . . .	371
7. Próba cieplna . . . . .	371
A. Cel próby cieplnej . . . . .	371
B. Metoda zwarcia . . . . .	372
C. Praca przeciwsozna . . . . .	373
a. Praca przeciwsozna przy nierównych przekładniach . . . . .	373
b. Praca przeciwsozna przy równych przekładniach i wprowadzeniu dodatkowego napięcia . . . . .	374
D. Inne metody zastępcze. Porównanie metod . . . . .	375
E. Pomiar temperatur podczas próby cieplnej . . . . .	376
F. Pomiar przyrostu temperatury uzwojeń po próbie cieplnej . . . . .	377
8. Próba zwarcia udarowego . . . . .	378
9. Pomiar oporności transformatora dla składowej zerowej prądu . . . . .	379
A. Technika pomiaru . . . . .	379
B. Dobór napięcia zasilającego i zakresów przyrządów pomiarowych . . . . .	379
C. Pomiar przy zasilaniu uzwojenia połączonego w trójkąt . . . . .	381
D. Zależność oporności $x_0$ od rozmieszczenia uzwojeń . . . . .	381

## Rozdział XIV. Badania profilaktyczne

1. Wyszczególnienie prób profilaktycznych . . . . .	382
2. Pomiar oporności izolacji uzwojeń . . . . .	383
3. Pomiar prądu upływności przy zastosowaniu napięcia wyprostowanego . . . . .	385
4. Pomiar pojemności uzwojeń oraz tg $\delta$ izolacji głównej . . . . .	386
5. Pomiar porównawczy pojemności w różnych temperaturach lub przy różnych częstotliwościach . . . . .	387
6. Próba na przebicie . . . . .	389
7. Pomiar napięcia jonizacji . . . . .	390

## Rozdział XV. Uszkodzenia transformatorów

1. Uszkodzenia żalaza czynnego . . . . .	392
A. Uszkodzenia powstające wskutek prądów wirowych . . . . .	392

B. Uszkodzenia powstające wskutek prądów pasożytniczych . . . . .	393
C. Uszkodzenia powstające wskutek sił magnetycznych . . . . .	394
D. Środki zapobiegawcze przeciw uszkodzeniu żelaza czynnego . . . . .	394
a. Środki zapobiegawcze konstrukcyjne . . . . .	395
b. Środki zapobiegawcze technologiczne . . . . .	395
c. Wykrywanie wad rdzenia w czasie produkcji . . . . .	395
2. Uszkodzenia uzwojeń . . . . .	395
A. Istota i przebieg uszkodzeń uzwojeń . . . . .	395
B. Konstrukcyjne przyczyny uszkodzeń uzwojeń . . . . .	396
C. Technologiczne przyczyny uszkodzeń uzwojeń . . . . .	396
D. Ruchowe przyczyny uszkodzeń uzwojeń . . . . .	397
3. Uszkodzenia przełączników zaczepów . . . . .	400
4. Uszkodzenia przepustów . . . . .	400
5. Uszkodzenia kadzi i części konstrukcyjnych . . . . .	401

### Rozdział XVI. Transport transformatorów

1. Uwagi ogólne . . . . .	403
2. Ciężar transportowy . . . . .	409
3. Umocowanie transformatora na platformie wagonu . . . . .	410
A. Siły działające podczas transportu . . . . .	410
B. Obliczanie sił wywracających . . . . .	410
C. Obliczanie sił działających poziomo . . . . .	411
D. Wykonanie zamocowań . . . . .	412
4. Opakowanie . . . . .	413
Wykaz piśmiennictwa . . . . .	414

