

INDICE

Introducción	11
I-1. Historia breve del desarrollo de las máquinas eléctricas	11
I-2. Desarrollo de la energética y la construcción de maquinaria eléctrica en la URSS	22
I-3. Magnitudes y sistemas de unidades principales	29
I-4. Racionalización de las ecuaciones del campo electromagnético	30
I-5. Representación de las magnitudes sinusoidales en los diagramas vectoriales	32
I-6. Leyes fundamentales de la electrotecnia con arreglo al análisis de los procesos en las máquinas eléctricas	33
I-7. Materiales que se usan en la construcción de maquinaria eléctrica	38

Apartado primero

MÁQUINAS DE CORRIENTE CONTINUA

Capítulo I. Tipo fundamental de máquinas de corriente continua y los elementos principales de su construcción	55
1- 1. Historia breve del desarrollo de las máquinas de corriente continua	55
1- 2. Tipo principal de máquina de corriente continua	56
1- 3. Rectificación de la corriente alterna a continua con auxilio del colector	57
1- 4. Elementos fundamentales de la construcción de una máquina de corriente continua	61
1- 5. Magnitudes nominales	71
Capítulo II. Circuito magnético de una máquina de corriente continua en marcha en vacío	73
2- 1. Observaciones generales	73
2- 2. Circuito magnético de una máquina de corriente continua. Determinación de la f. m. principal	74
2- 3. Entrehierro. Curva de distribución de la inducción en el entrehierro	76
2- 4. Método de reducción. Arco polar previsto	78
2- 5. Longitud prevista del inducido	79
2- 6. F. m. del entrehierro para un inducido liso	80
2- 7. F. m. del entrehierro para un inducido dentado	80
2- 8. Datos preliminares	81
2- 9. F. m. de la zona de los dientes	82
2-10. F. m. del soporte del inducido	85
2-11. F. m. de los polos y la culata	85
2-12. Curva de magnetización de la máquina	88
2-13. Ejemplo numérico	89

Capítulo III. Arrollamientos y f. e. m. del inducido de una máquina de corriente continua	94
3- 1. Observaciones preliminares	94
3- 2. Clasificación de los devanados de inducido de las máquinas de corriente continua	95
3- 3. Principio de fabricación de los devanados simples de un inducido anular y sus características fundamentales	95
3- 4. Devanado de lazo simple de un inducido anular	97
3- 5. Devanado ondulado simple de un inducido anular	107
3- 6. Fuerza electromotriz de un inducido anular	110
3- 7. Principios del bobinado de los arrollamientos de tambor	112
3- 8. Construcción de los arrollamientos de un inducido de tambor	114
3- 9. Pasos de un devanado	118
3-10. Arrollamientos de lazo simples del inducido de tambor	123
3-11. Devanados ondulados simples del inducido de tambor	135
3-12. Devanados ondulados simples obtenidos con ayuda de procedimientos artificiales	140
3-13. Devanados imbricados combinados	144
3-14. Arrollamientos ondulados combinados	149
3-15. Condiciones de simetría de los arrollamientos de un inducido de tambor	158
3-16. Conexiones igualadoras (compensadores)	159
3-17. Arrollamiento especial en serie y paralelo de un inducido de tambor (arrollamiento en pata de rana)	168
3-18. Características comparativas de los arrollamientos de distintos tipos	172
3-19. F. e. m. del arrollamiento de un inducido de tambor	172
Capítulo IV. Reacción del inducido	175
4- 1. Fuerza magnetizante de la máquina bajo carga	175
4- 2. Fuerzas magnetizantes transversal y longitudinal del inducido	179
4- 3. Reacción del inducido en el generador	180
4- 4. Influencia de la reacción longitudinal del inducido en la f. e. m. de la máquina	187
4- 5. Reacción del inducido en el motor	188
Capítulo V. Conmutación	189
5- 1. Razonamientos generales. Escala de chisporroteo	189
5- 2. Esencia del proceso de conmutación	191
5- 3. Conmutación por resistencia sin consideración de las fuerzas electromotrices, inducidas en la sección cortocircuitada	191
5- 4. Conmutación teniendo en cuenta las resistencias de los eslabones y el arrollamiento	196
5- 5. Fuerzas electromotrices inducidas en la sección cortocircuitada durante el proceso de conmutación	196
5- 6. Conmutación teniendo en cuenta las f. e. m. en la sección cortocircuitada siendo la anchura de la escobilla igual a la división de colector	199
5- 7. Conmutación en el caso en que la anchura de la escobilla es mayor que una división de colector	204
5- 8. Coeficiente de autoinducción resultante y determinación de la f. e. m. reactiva	209
5- 9. Inductancia de dispersión de la sección cortocircuitada en el período de su conmutación	213
5-10. Procedimientos especiales de disminución de la f. e. m. reactiva de conmutación	215
5-11. Reacción de conmutación del inducido	216
5-12. Causas del chisporroteo de carácter electromagnético	217
5-13. Causas del chisporroteo de carácter potencial	219
5-14. Causas del chisporroteo de carácter mecánico	220
5-15. Característica general del chisporroteo en el colector con contacto de carbón y cobre	221
5-16. Fuego circular en el colector	223

Capítulo VI. Medios de mejoramiento de la conmutación y métodos de su investigación experimental	225
6- 1. Medios de lucha contra el chisporroteo de carácter electromagnético	225
6- 2. Disminución de la f. e. m. reactiva e_r	225
6- 3. Creación del campo de conmutación mediante el desvío de las escobillas de la línea neutra	225
6- 4. Creación del campo de conmutación por medio de los polos auxiliares	227
6- 5. Influencia de los polos auxiliares sobre el campo fundamental	232
6- 6. Influencia de la saturación de los polos auxiliares sobre la conmutación	233
6- 7. Arrollamiento compensador	234
6- 8. Medios auxiliares contra el fuego circular	236
6- 9. Escobillas y sus características	238
6-10. Naturaleza del contacto por escobilla	241
6-11. Métodos experimentales del análisis y la regulación de la conmutación	243
6-12. Registro oscilográfico de los procesos de conmutación	248
6-13. Deduciones prácticas de las investigaciones teóricas y experimentales de la conmutación	251

Capítulo VII. Pérdidas de energía y rendimiento de las máquinas eléctricas	255
7- 1. Observaciones preliminares	255
7- 2. Clasificación de las pérdidas	256
7- 3. Pérdidas mecánicas	256
7- 4. Pérdidas fundamentales en el hierro (acero)	259
7- 5. Pérdidas fundamentales en el cobre	263
7- 6. Pérdidas adicionales	265
7- 7. Pérdidas sumarias en la máquina de corriente continua y rendimiento de ésta	267
7- 8. Variación del rendimiento de las máquinas de corriente continua con la variación de la carga y el rendimiento máximo	268
7- 9. Determinación experimental del rendimiento de la máquina de corriente continua	270

Capítulo VIII. Generadores de corriente continua	272
8- 1. Observaciones preliminares	272
8- 2. Clasificación de los generadores de corriente continua por el método de excitación	272
8- 3. Proceso energético del generador de corriente continua	273
8- 4. Ecuación de la f. e. m. del generador para n -const	274
8- 5. Momento electromagnético del generador	275
8- 6. Ecuación de los momentos del generador	277
8- 7. Características fundamentales de los generadores de corriente continua	278
8- 8. Características de un generador de excitación independiente	279
8- 9. Características del generador de excitación en derivación	288
8-10. Generador de excitación en serie	292
8-11. Generador de excitación compuesta	293

Capítulo IX. Funcionamiento conjunto de los generadores de corriente continua	297
9- 1. Razonamientos generales	297
9- 2. Funcionamiento paralelo de los generadores de excitación en derivación	297
9- 3. Funcionamiento paralelo de los generadores de excitación compuesta	300

Capítulo X. Motores de corriente continua	303
10- 1. Principio de reciprocidad de las máquinas eléctricas	303
10- 2. Clasificación de los motores de corriente continua	304
10- 3. Proceso energético y esquema energético de los motores de corriente continua	304
10- 4. Ecuación de las f. e. m. del motor	305
10- 5. Ecuación de los momentos del motor	306
10- 6. Características de los motores	308
10- 7. Métodos de puesta en marcha de los motores de corriente continua	309
10- 8. Arranque no reostático del motor	309

10- 9. Método de arranque reostático. Reóstatos de arranque	312
10-10. Puesta en marcha de los motores con auxilio de un grupo de arranque especial	314
10-11. Características de funcionamiento de los motores	315
10-12. Características mecánicas de los motores de corriente continua $n=f(M)$	322
10-13. Características de frenado de los motores de corriente continua	325
10-14. Características de regulación de los motores de corriente continua	328
10-15. Regulación de la velocidad de rotación con ayuda de un reóstato conectado en el circuito del inducido	329
10-16. Regulación de la velocidad del motor variando la excitación	331
10-17. Regulación de la velocidad mediante la variación de la tensión en la red	337
Capítulo XI. Tipos fundamentales y especiales de máquinas de corriente continua y perspectivas de su desarrollo	340
11-1. Observaciones preliminares	340
11-2. Tipos fundamentales de máquinas de corriente continua	340
11-3. Motores de laminación de corriente continua	350
11-4. Máquinas de corriente continua con inducido liso	353
11-5. Motores de tracción de corriente pulsatoria	357
11-6. Máquinas especiales de corriente continua	365
Aparfado segundo	
TRANSFORMADORES	
Capítulo XII. Definiciones y elementos de construcción fundamentales de los transformadores	383
12-1. Evolución de la construcción de transformadores	383
12-2. Definiciones fundamentales	385
12-3. Magnitudes nominales de los transformadores	386
12-4. Tipos básicos de transformadores	387
12-5. Elementos constructivos principales de los transformadores	396
12-6. Transformadores de alto voltaje y de gran potencia	407
Capítulo XIII. Condiciones físicas de funcionamiento del transformador	412
13-1. Principio de funcionamiento del transformador	412
13-2. Ecuaciones de las f. m. y las f. e. m. del transformador	412
13-3. Relación de transformación de las tensiones del transformador	415
13-4. Ecuaciones de la f. m. y la f. e. m. para la variación sinusoidal de las tensiones y corrientes	415
13-5. El transformador reducido	417
13-6. Ecuaciones de las f. m. y f. e. m. del transformador reducido	418
13-7. Circuito equivalente del transformador	419
Capítulo XIV. Funcionamiento en vacío del transformador monofásico	422
14-1. Observaciones preliminares	422
14-2. Funcionamiento en vacío de un transformador monofásico	422
14-3. Funcionamiento en vacío de un transformador elemental	423
14-4. Funcionamiento en vacío de un transformador monofásico real	429
14-5. Pérdidas en el transformador en vacío	431
14-6. Influencia de la forma de la curva de tensión en las pérdidas en el acero	435
14-7. Circuito equivalente de un transformador sin carga	436
14-8. Ensayo del transformador en vacío	436
Capítulo XV. Clasificación de los sistemas magnéticos y de los métodos de conexión de los devanados de los transformadores trifásicos. Fuerza electromotriz de los transformadores trifásicos	438
15-1. Clasificación de los sistemas magnéticos de transformadores trifásicos	438
15-2. Métodos de conexión de los devanados del transformador trifásico	440
15-3. F. e. m. de los devanados trifásicos del transformador	441
15-4. Conexión del devanado trifásico del transformador en estrella	442

15-5. Conexión idel devanado trifásico del transformador en triángulo	444
15-6. Conexión del devanado trifásico del transformador en zigzag	446
15-7. Métodos normalizados de conexión de los devanados de transformadores trifásicos en la URSS	446
15-8. Esquemas y grupos de conexiones de los devanados	447
15-9. Aplicación de los diversos métodos de conexión de los devanados	452
Capítulo XVI. Funcionamiento en vacío del transformador trifásico	453
16-1. Transformador sin carga con conexión de los devanados en Y/Y_0 — 12	453
16-2. Transformador en vacío con conexión de los devanados en Δ/Y	456
16-3. Funcionamiento en vacío del transformador trifásico con conexión de los devanados en Y/Δ	456
16-4. Conexión en Y_0/Y_0 — 12 del transformador trifásico con devanado terciario	457
16-5. Datos característicos del funcionamiento del transformador en vacío	458
16-6. Ejemplo numérico	458
Capítulo XVII. Régimen de cortocircuito de los transformadores. Dispersión en los transformadores	460
17- 1. Observaciones preliminares	460
17- 2. Tensión de cortocircuito	460
17- 3. Condiciones físicas del funcionamiento del transformador en cortocircuito	461
17- 4. Diagrama de cortocircuito del transformador reducido	462
17- 5. Circuito equivalente del transformador en cortocircuito	463
17- 6. Triángulo de un transformador en cortocircuito	464
17- 7. Pérdidas de cortocircuito	465
17- 8. Determinación de los parámetros de cortocircuito del transformador	466
17- 9. Cortocircuito en los transformadores trifásicos	467
17-10. Dispersión en los transformadores con devanados concéntricos y alternados	467
17-11. Ejemplo numérico	473
Capítulo XVIII. Transformadores bajo carga	474
18- 1. Observaciones preliminares	474
18- 2. Transformador elemental bajo carga	474
18- 3. Transformador real bajo carga	475
18- 4. Diagramas vectoriales del transformador equivalente	477
18- 5. Diagramas vectoriales simplificados del transformador	478
18- 6. Relación entre la tensión secundaria reducida y el $\cos \varphi_2$ de carga	479
18- 7. Determinación de la variación de la tensión secundaria	480
18- 8. Ejemplo numérico	482
18- 9. Característica exterior del transformador	482
18-10. Rendimiento del transformador (η)	482
18-11. Ejemplo numérico	485
Capítulo XIX. Regímenes desequilibrados de funcionamiento de los transformadores trifásicos	486
19- 1. Observaciones preliminares	486
19- 2. Método de las componentes simétricas	486
19- 3. Condiciones del análisis de los regímenes asimétricos y de los cortocircuitos	488
19- 4. Carga disimétrica de un transformador trifásico sin hilo neutro	488
19- 5. Carga disimétrica de un transformador trifásico con conexión de los devanados en Δ/Y — 11	489
19- 6. Carga disimétrica de un transformador trifásico con los devanados conectados en Y/Y y con el neutro desconectado de la tierra	491
19- 7. Carga disimétrica de un transformador trifásico con el hilo neutro puesto a tierra y con los devanados conectados en Y/Y_0	492
19- 8. Cortocircuito de dos fases del transformador trifásico con conexión de los devanados en Y/Y_0	496

19- 9. Cortocircuito de una fase del transformador trifásico con devanados conectados en Y/Y_0	497
19-10. Diagrama de un transformador trifásico con una fase en cortocircuito y con conexión de los devanados en Y/Y_0	501
19-11. Carga disimétrica de un transformador trifásico con conexión de los devanados en $\Delta/Y_0 - 11$	503
19-12. Transformador trifásico con devanados conectados en Δ/Y_0 y con una fase en cortocircuito	503
19-13. Determinación de la resistencia de secuencia de cero	504
19-14. Funcionamiento del transformador trifásico con conexión en triángulo abierto	505
Capítulo XX. Funcionamiento en paralelo de los transformadores	508
20-1. Condiciones del funcionamiento en paralelo de los transformadores	508
20-2. Funcionamiento en paralelo de transformadores con relaciones de transformación desiguales	509
20-3. Funcionamiento en paralelo de transformadores trifásicos con diferentes grupos de conexión de los devanados	513
20-4. Funcionamiento en paralelo de transformadores con tensiones de cortocircuito desiguales	515
Capítulo XXI. Regímenes transitorios de los transformadores	518
21-1. Clasificación de los regímenes transitorios	518
21-2. Sobrecorrientes	518
21-3. Fenómenos térmicos de cortocircuito	522
21-4. Esfuerzos mecánicos durante el cortocircuito instantáneo	523
21-5. Causas y carácter de las sobretensiones en los transformadores	525
21-6. Circuito equivalente de un transformador en caso de sobretensiones	527
21-7. Distribución inicial de la tensión a lo largo del devanado del transformador	528
21-8. Proceso transitorio y distribución final de la tensión	530
21-9. Protección del transformador contra sobretensiones	532
Capítulo XXII. Calentamiento y refrigeración de los transformadores	536
22- 1. Observaciones preliminares	536
22- 2. Métodos de refrigeración de los transformadores en aceite	536
22- 3. Flujos caloríficos y condiciones de difusión del calor en un transformador en aceite	537
22- 4. Calentamiento del núcleo de un transformador	538
22- 5. Calentamiento del devanado del transformador	539
22- 6. Función del aceite y de la cuba en la refrigeración transformador	541
22- 7. Excésos máximos de temperatura admisibles	543
22- 8. Efecto de la temperatura sobre el plazo de servicio de un transformador	544
22- 9. Constantes del tiempo de calentamiento de un transformador	545
22-10. Capacidad de carga del transformador	546
22-11. Control de la temperatura y protección térmica de los transformadores	548
Capítulo XXIII. Tipos especiales de transformadores	551
23-1. Nociones generales	551
23-2. Autotransformadores	551
23-3. Transformadores de tres devanados	555
23-4. Transformadores con regulación de la tensión bajo carga	563
23-5. Transformadores con regulación suave de la tensión	566
23-6. Transformadores para rectificadores a arco de mercurio	567
23-7. Transformadores de ensayos	576
23-8. Transformadores para soldadura	579
23-9. Datos breves sobre diversos tipos de transformadores	580
Capítulo XXIV. Envejecimiento del aislamiento y capacidad de carga de los transformadores y reactores	584
Índice bibliográfico	587
Índice alfabético	599