

APPLICATIONS EN ÉLECTRO- MAGNÉTISME

Cours et problèmes
résolus

Dominique Jacob



TABLE DES MATIERES

Chapitre 1. Lois fondamentales de l'électromagnétisme

1	Charge, champ et potentiel électrique	7
2	Le champ magnétique	9
2.1	Postulat de Biot et Savart	9
2.2	Le flux du champ magnétique : définition	11
2.3	Le théorème d'Ampère	12
2.4	Champ au centre d'une spire ou d'une bobine plate	13
2.5	Influence de la matière sur le champ magnétique	14
2.6	La loi d'Hopkinson.....	16
3	Les forces magnétiques, l'énergie magnétique.....	18
3.1	Effet du champ magnétique sur une charge, la force de Lorentz	18
3.2	Force magnétique sur un circuit, la force de Laplace	18
3.3	Travail des forces de Laplace	19
3.4	Force et couple d'origine magnétique en fonction de l'énergie	21
3.5	Moment magnétique, interaction entre deux champs magnétiques	22
3.6	Interaction entre un moment magnétique et un champ magnétique	22
4	L'induction électromagnétique	24
4.1	Le champ électromoteur	24
4.2	La loi de Faraday	25
4.3	Inductance et inductance mutuelle	26
4.4	Energie magnétique selon l'inductance.....	28
4.5	Modélisation des pertes dans le circuit magnétique.....	28

Chapitre 2. Introduction aux ondes électromagnétiques

1	Les outils mathématiques utiles.....	31
1.1	Caractérisation d'un champ de vecteurs	31
1.2	Le flux d'un vecteur et la divergence	38
2	Établissement des équations de Maxwell.....	44
2.1	Limite et but de la présentation	44
2.2	Les lois régissant le champ électriques et magnétique	45
2.3	Résumé : les 4 équations de Maxwelle.....	54

3	Une solution des équations de Maxwell dans le vide	55
3.1	But et limites de l'étude.....	55
3.2	Premières contraintes liées aux équations à résoudre	55
3.3	Expression des équations en coordonnée cartésienne	57
4	Les équations de Maxwell dans un conducteur	72
4.1	Conditions de l'étude.....	72
4.2	Caractérisation locale d'un conducteur (loi d'Ohm locale)	72
4.3	Répartition des champs, l'effet de peau.....	74
5	L'effet de peau dans une barre rectangulaire mince.....	79
5.1	Généralités.....	79
5.2	Calcul avec les vecteurs complexes	80
5.3	Détermination de la répartition du champ électrique	81
5.4	Répartition de la densité de courant	84
5.5	Résistance apparente d'une barre conductrice mince	88

Chapitre 3. Propagation sur les lignes électriques

1	Propagation sur les lignes électriques sans pertes.....	93
1.1	Modèle d'une ligne sans pertes.....	93
1.2	Tension et courant le long de la ligne	95
1.3	Interprétation de la solution.....	96
1.4	Influence de la source et de la charge, les coefficients de réflexion	97
1.5	Puissance transmise du générateur à la charge	100
1.6	Tension aux extrémités de la ligne	101
2	Étude du régime sinusoïdal	109
2.1	Impédance d'entrée de la ligne chargée	109
2.2	Impédance d'entrée d'une ligne quart d'onde.....	111
2.3	Adaptation d'impédance par ligne quart d'onde	112
2.4	Onde stationnaire sur la ligne	113
2.5	Evolution de l'amplitude de la tension sur la ligne.....	114
3	Notes sur les lignes avec pertes et les antennes	116
3.1	Modèle d'une antenne comme une ligne ouverte avec « pertes ».....	116
3.2	Equations donnant la tension et courant le long de la ligne	117
3.3	Solution en régime sinusoïdal.....	118
3.4	Solution dans le cas où les pertes sont faibles	119
3.5	Impédance d'entrée d'une antenne	121
3.6	Impédance d'entrée d'une antenne quart d'onde à la résonance	123
3.7	Résonance d'une antenne courte.....	125

Chapitre 4. Le moteur à répulsion

1	Présentation du moteur à répulsion.....	127
1.1	Constitution et principe de fonctionnement	127
1.2	Le champ magnétique de l'inducteur	128
1.3	Rôle du collecteur	129
2	Modélisation du moteur à répulsion	130
2.1	Notation et limites de la modélisation simplifiée.....	130
2.2	Remarque sur la réductance du trajet des lignes de champs.....	131
2.3	Le champ magnétique en charge : la réaction d'induit	132
2.4	Le moment magnétique de l'induit	133
2.5	Le couple électromagnétique	134
2.6	Force magnétomotrice totale sur le circuit magnétique	135
2.7	Champ magnétique créé par l'inducteur	137
2.8	FEM induite entre les balais.....	137
2.9	Le courant au rotor	144
2.10	Modèle obtenu : les équations régissant le fonctionnement.....	145
3	Fonctionnement en régime permanent sinusoïdal	146
3.1	Expression des équations selon la transformation de Laplace.....	146
3.2	Expression des signaux en régime sinusoïdal	147
4	Modèle a flux non forcé	152
4.1	Les équations régissant le fonctionnement.....	152
4.2	Le flux en régime permanent sinusoïdal.....	154
4.3	Le courant au rotor	155
4.4	Le courant absorbé	156
4.5	Le couple instantané.....	158
4.6	Le couple moyen.....	158
4.7	Caractéristiques en fonction de la vitesse	161

Chapitre 5. Étude d'un capteur à courants de Foucault

1	La mesure par courants de Foucault.....	165
1.1	Principe des capteurs à courants de Foucault	165
1.2	Constitution du capteur à courants de Foucault	166
2	Mesure de l'épaisseur d'une tôle métallique.....	167
2.1	Modélisation problème	167
2.2	Expression de champs dans la tôle	168
2.3	Champs à l'arrière de la tôle	171
2.4	Calcul des champs.....	172
2.5	Le champ à l'arrière de la tôle, efficacité du blindage.....	180

3	Mesure d'épaisseur d'un revêtement métallique.....	182
3.1	Position et modélisation du problème	182
3.2	Répartition des champs	183
3.3	Les pertes surfaciques en fonction de l'épaisseur du revêtement.....	186
3.4	Pertes totales dans la tôle revêtue	191

Chapitre 6. Le rayonnement d'une antenne

1	Les potentiels créés par une antenne courte.....	195
1.1	Constitution et modèle de l'antenne courte	195
1.2	Potentiel électrostatique créé par le dipôle	196
1.3	Potentiel vecteur du champ magnétique créé par le doublet.....	197
1.4	Effet de la propagation : les potentiels retardés	198
1.5	Potentiel vecteur magnétique retardé	198
1.6	Calcul du potentiel électrique retardé.....	199
1.7	Expression des champs compte tenu de la propagation	200
2	Rayonnement du dipôle oscillant.....	201
2.1	Calcul du champ électrique via les potentiels retardés.....	201
2.2	Calcul du champ magnétique via le potentiel vecteur retardé	205
2.3	Remarques sur l'onde rayonnée loin du dipôle.....	206
2.4	Diagramme de rayonnement.....	208
2.5	Puissance rayonnée et résistance de rayonnement.....	210
2.6	Portée de l'émission	211
3	Rayonnement d'une antenne.....	212
3.1	Modélisation de l'antenne comme une succession de dipôles	212
3.2	Répartition du courant le long de l'antenne.....	213
3.3	Champs rayonnés par l'antenne	215
3.4	Diagramme de rayonnement.....	221
4	Note sur le rayonnement du dipôle magnétique	223
4.1	Notion de dipôle magnétique	223
4.2	Le potentiel scalaire magnétique.....	225
4.3	Le champ rayonné par le dipôle magnétique	228
4.4	Remarque sur l'impédance d'onde en champ proche.....	229
4.5	Résistance de rayonnement de la bobine	233
4.6	Puissance apparente du dispositif d'alimentation	235

Annexes

1	Outils mathématiques de base utiles en physique	237
1.1	La multiplication des vecteurs	237
1.2	Dérivée et dérivée partielle d'une fonction scalaire	238
1.3	Le gradient	239
2	Amplitude de la somme de deux sinusoïdes déphasées	241
2.1	Représentation graphique des sinusoïdes.....	241
2.2	Calcul via les équations des sinusoïdes.....	242
2.3	Calcul via la représentation complexe des sinusoïdes.....	243
2.4	Calcul via la représentation vectorielle des sinusoïdes	244
3	Trigonométrie hyperbolique à variable complexe	246
4	Note sur la transformation de Laplace	247
4.1	Intérêt pour simplifier le calcul des dérivées et intégrales.....	247
4.2	Théorème du retard.....	247
4.3	Lien de la transformation de Laplace avec le régime sinusoïdal	248
5	Coordonnées cartésiennes	248
6	Coordonnées cylindriques.....	249
7	Coordonnées sphériques.....	252
8	Terminologie et propriétés générales des ondes	256
8.1	Signal émis puis reçu via une onde.....	256
8.2	La propagation des signaux sinusoïdaux, terminologie.....	256
8.3	Les interférences.....	257
8.4	Un exemple d'onde stationnaire	259
8.5	L'effet Doppler	264