

UNIVERSITÉ D'ALGER

2/75

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة
BIBLIOTHÈQUE

CALCUL OPTIMAL DES MOTEURS
ASYNCHRONES DE MOYENNE PUISSANCE

Proposé par :

M^r. V. ARTICHEVSKI

Étudié par :

AIT ZAUCHE Abdelhamid

PROMOTION 70 - 75

UNIVERSITÉ D'ALGER

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRICITE

PROJET DE FIN D'ÉTUDES

**CALCUL OPTIMAL DES MOTEURS
ASYNCHRONES DE MOYENNE PUISSANCE**

Proposé par :

M^r. V. ARTICHEVSKI

Étudié par :

AIT ZAUCHE Abdelhamid

PROMOTION 70 - 75

Qu'il me soit permis de remercier tout particulièrement Mr ARTICHEVSKI qui m'a suivi et orienté dans mon travail.

Je tient également à remercier tous les professeurs et assistants de l'Ecole Nationale polytechnique qui ont contribué à ma formation ainsi que toutes les personnes qui, de près ou de loin , m'ont aidé dans ma tâche.

Que tout le personnel du centre de calcul du C.E.R.I. trouvent ici mon entière reconnaissance.

AIT ZAUCHE Abdelhamid.

- S O M M A I R E -

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I METHODE DE CALCUL	
I. Dimensions principales	2
II. Enroulement, encoches et dents du stator.....	7
III. Enroulement, encoches et dents du rotor	15
IV. Courants magnétisants	20
V. Paramètres électriques.....	25
VI. Pertes mécaniques et dans le fer	30
CHAPITRE II EQUATIONS ET ORGANIGRAMME DE CALCUL	
1. Dimensions principales	35
2. Grandeurs du stator	38
3. Grandeurs du rotor	42
4. Courant magnétisant	47
5. Paramètres électriques	51
6. Caractéristiques de service	53
7. Caractéristiques de démarrage	56
CHAPITRE III APPLICATION	63
CONCLUSION	70
ANNEXE PROGRAMME DE CALCUL	71

I N T R O D U C T I O N

Lorsqu'on veut construire une machine électrique, on ne doit pas seulement tenir compte de ses propriétés mécaniques mais de faire en sorte que sa construction et son exploitation soient économiques et rentables.

Il existe toujours des problèmes dans le domaine de construction de machines du point de vue optimisation du calcul.

De plus, l'apparition de nouvelles méthodes de calcul et même l'utilisation de nouveaux matériaux de construction nécessitent de refaire le calcul électromagnétique, mécaniques, et de ventilation de la machine.

A l'heure actuelle, 98% de l'énergie électrique est produite sous forme alternative triphasée. La plus grande partie de cette énergie est utilisée par les moteurs asynchrones.

En outre, les machines asynchrones sont très répandues. Parmi elles, les machines asynchrones de moyenne puissance (allant de 1 à 100 kW) à court-circuit sont utilisées plus largement que les autres.

A peu près 60% des machines électriques sont des machines asynchrones de moyenne puissance.

C'est la raison pour laquelle on se propose d'étudier l'optimisation du calcul des moteurs asynchrones de moyenne puissance.

A cet effet, on a proposé d'utiliser la méthode digitale pour avoir la possibilité de faire le calcul pour différentes variantes.

L'étude présentée consiste à établir un organigramme et un programme de calcul des paramètres et éléments essentiels d'un moteur asynchrone de moyenne puissance.

CHAPITRE I

METHODE DE CALCUL

Nous exposerons dans ce chapitre les différentes phases de calcul permettant de déterminer notre moteur.

I . / Dimensions principales.

Les dimensions principales ou dimensions de base du moteur sont:

D = diamètre intérieur du stator.

$L\delta$ = longueur idéale ou longueur théorique du stator.

Les éléments intervenant dans son fonctionnement sont la vitesse N, l'induction B dans l'entrefer (en Tesla) et la densité linéaire de courant A (en A/cm).

La liaison entre les dimensions principales et les contraintes tant électriques que magnétiques est donnée par:

$$\frac{D^2 \cdot L\delta \cdot N}{P_s} = \frac{6,1 \cdot 10^7}{a\delta \cdot k_B \cdot k_{Ol} \cdot A \cdot B\delta}$$

I . 1 / Nombre de paire de pôles.

Il se déduit de la vitesse de synchronisme et de la fréquence:

$$p = \frac{60 \cdot f}{N}$$

I . 2 / Puissance électromagnétique.

C'est la puissance qui est transmise du stator vers le rotor. Elle est donnée par la relation:

$$P_s = m \cdot E_1 \cdot I_{1N} \cdot 10^{-3} \quad (\text{kVA})$$

La puissance nominale est:

$$P_N = m \cdot U_{1N} \cdot I_{1N} \cdot \cos\phi_N \cdot 10^{-3}$$

donc en fonction de la puissance nominale, la puissance électromagnétique intérieure de la machine est:

$$P_S = \frac{P_N}{\cos \phi_{N \cdot n} N} \cdot \frac{E_1}{U_{1N}}$$

En posant :

$$\frac{E_1}{U_{1N}} = k_E$$

On aura :

$$P_S = k_E \frac{P_N}{\cos \phi_{N \cdot n} N}$$

Sur la figure 1.2, k_E est donné en fonction du nombre de paire de pôles.

I.3 / Diamètre intérieur du stator :

Il est déterminé à partir de la puissance électromagnétique de la machine et en fonction du nombre de paire de pôles.

Les variations du diamètre intérieur du stator sont représentées sur la figure I.1

I.4 / Pas polaire :

Le pas polaire est défini comme étant la longueur de l'arc de cercle ayant le diamètre D correspondant à un seul pôle.

Il est donné par :

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p}$$

I.5 / Densité de courant et induction dans l'entrefer :

A désigne la densité linéaire de courant c'est à dire le nombre d'ampères-tours par mètre de périphérie de l'induit et B_δ l'induction magnétique dans l'entrefer.

Alors que l'induction B_δ caractérise l'utilisation magnétique de la machine, la densité linéaire A en caractérise l'utilisation électrique.

A et B_δ sont donnés en fonction du pas polaire τ_p et du nombre de paires de pôles p sur la figure I.4 .

I.6 / Contraintes magnétiques :

- Induction dans l'entrefer : elle a une valeur comprise entre 0,7 et 0,9 tesla. Les petites valeurs correspondent aux machines ayant un petit nombre de paires de pôles.

- Induction dans le noyau ferromagnétique :

+ Dans la culasse du stator : $1 \leq B \leq 1,5 \text{ T}$

+ Dans les dents du stator :

- Au milieu de la dent : $1,4 \leq B \leq 1,7 \text{ T}$

- A la base de la dent : $1,6 \leq B \leq 2,1 \text{ T}$

+ Dans la culasse du rotor :

$$1 \leq B \leq 1,6 \text{ T}$$

+ Dans les dents du rotor :

- Au milieu de la dent : $1,5 \leq B \leq 1,8 \text{ T}$

- A la base de la dent : $1,6 \leq B \leq 2,2 \text{ T}$

I.7 / Longueur idéale ou longueur théorique du stator :

La longueur idéale de la machine correspond à la longueur axiale du noyau ferromagnétique d'une machine équivalente qui aurait constant le champ magnétique dans l'entrefer et égal à la valeur maximum du champ dans l'entrefer de la machine réelle. Elle est donnée par la relation :

$$L_{\delta} = \frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot P_s}{a_{\delta} \cdot k_B \cdot K_{O1} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot D^2 \cdot N}$$

où :

- P_s = puissance électromagnétique

- N = vitesse de rotation

- D = diamètre intérieur du stator

- B_{δ} = induction dans l'entrefer

- A = densité linéaire de courant

- k_B = coefficient de forme de l'induction dans l'entrefer qui intervient du fait que l'induction magnétique dans l'entrefer n'est pas exactement sinusoïdale.

- a_{δ} = coefficient de pôle théorique (facteur de recouvrement idéale)

$$a_{\delta} = \frac{b_i}{\tau} \quad (a_{\delta} = 0,68 \text{ à } 0,72)$$

- 5 -

b_i est appelée longueur idéale de l'arc polaire ; elle correspond à la longueur de l'arc polaire d'une machine équivalente ayant dans l'entrefer un champ magnétique constant et égal à la valeur maximum du champ dans l'entrefer machine réelle

Comme on ne tient pas compte du refroidissement, nous avons donc :

$$L_1 = L = L_\delta$$

I.8 / Facteur de géométrie :

Il est défini comme étant le rapport de la longueur idéale du stator au pas polaire.

$$\lambda = \frac{L_\delta}{\tau}$$

Il augmente en fonction du nombre de paire de pôles ; mais pour une valeur déterminée de p , on peut modifier λ entre certaines limites sans pour autant rendre le type de moteur économiquement défavorable.

Les limites normales de λ sont représentées en fonction de p sur la figure I.3 .

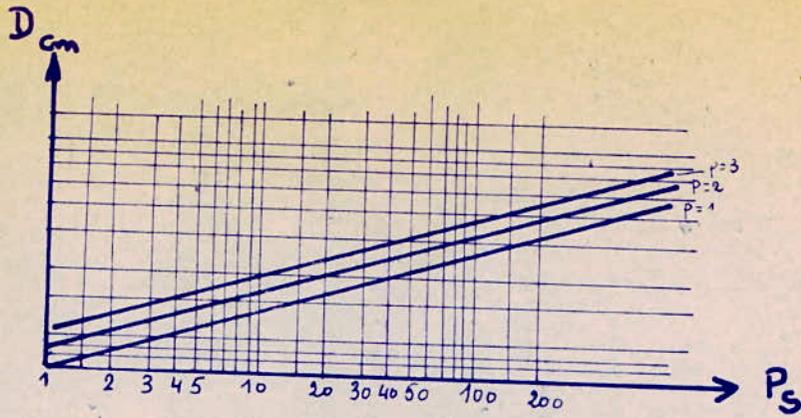


fig I.1 $D = f(P_s)$

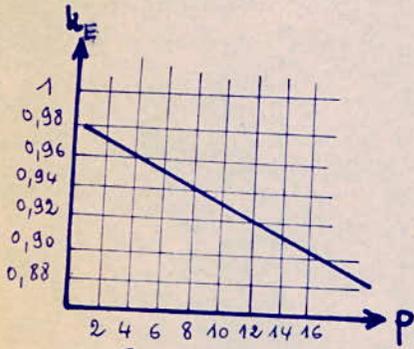


fig I.2 $k_E = f(P)$

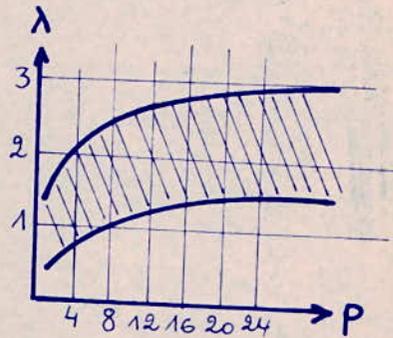


fig I-3 $\lambda = f(P)$

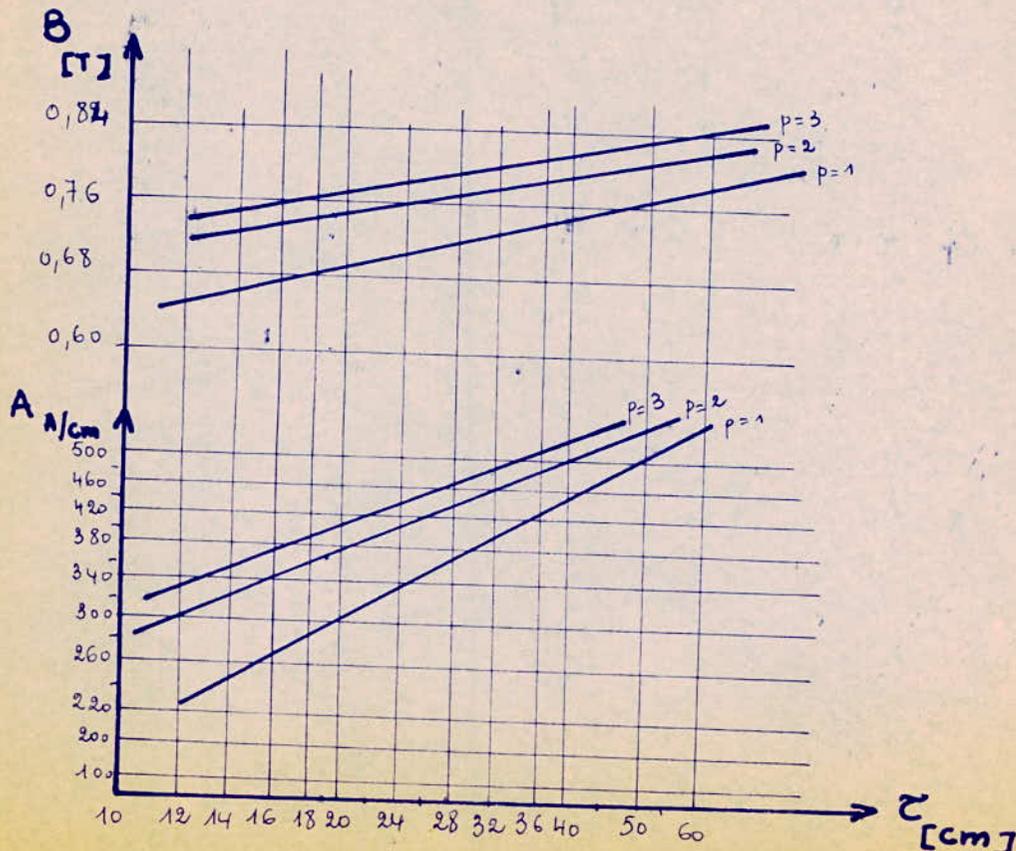


fig I.4. A et $\theta_s = f(\tau)$

II. Enroulements, Encoches et Dents du stator - Entrefer :

Les encoches destinées à recevoir l'enroulement présentent des profils différents suivants la nature des conducteurs et la grosseur des machines.

En fonction de la puissance et de la tension de la machine, les encoches peuvent être :

- Ouvertes
- Semi-ouvertes
- Semi-fermées
- Fermées

Les encoches semi-ouvertes et ouvertes sont généralement rectangulaires ; les encoches semi-fermées et fermées sont généralement de forme rectangulaire ou trapézoïdale.

Pour les machines de moyenne puissance, les encoches du stator auront des parois trapézoïdales ; cette forme est plus avantageuse sur un stator que sur un rotor car elle offre une plus grande surface pour la même induction dans les dents et pour le même diamètre d'entrefer.

Le type d'enroulement préféré pour le stator est l'enroulement à deux couches.

Comparativement à l'enroulement à une seule couche, il offre l'avantage d'être exécuté comme un enroulement à pas raccourci et de ce fait les facteurs d'enroulement des harmoniques supérieurs sont fortement diminués.

II.1 / Nombre d'encoches par pôle et phase :

Les enroulements les plus répandus sont les enroulements ayant un nombre entier d'encoches par pôle et par phase.

Le nombre d'encoches par pôle et par phase doit être dans tous les cas supérieur à 2 et ce afin que la dispersion provenant des champs harmoniques supérieurs demeure faible.

Le nombre d'encoches du stator sera :

$$Z_1 = 2mpq_1$$

avec m qui représente le nombre de phases et q_1 le nombre d'encoches par pôle et par phase.

II.2 / Pas dentaire :

Il est défini comme étant la distance entre les axes de deux encoches successives.

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1}$$

II.3 / Nombre de conducteurs efficaces dans une encoche du stator :

$$U_{nl} = \frac{A \cdot t_1 \cdot a_1}{I_{1N}}$$

Avec :

- A = densité linéaire de courant
- t_1 = pas dentaire
- a_1 = nombre de branches
- I_{1N} = courant nominal

Le courant nominal primaire est calculé par la relation :

$$I_{1N} = \frac{P_N \cdot 10^{-3}}{m \cdot U_1 \cdot \eta_N \cdot \cos \phi_N}$$

II.4 / Section d'un conducteur élémentaire :

La section d'un conducteur résultera de la relation :

$$S_c = \frac{I_{1N}}{a_1 \cdot m_{el} \cdot \Delta C}$$

où n_{el} représente le nombre de conducteurs élémentaires et.

ΔC la densité du courant.

Pour les machines de moyenne puissance ΔC varie de 4,5 à 6 A/mm².

La section des conducteurs est normalisée. On choisira à partir du tableau 2.1, la section qui se rapproche le plus de la valeur trouvée ainsi que le diamètre sans et avec isolant.

Sections et diamètres normalisés du conducteur

Diamètre sans isolant [mm]	Diamètre avec isolant [mm]	Section normalisée [mm ²]
0,64	0,69	0,322
(0,67)	0,72	0,353
0,74	0,80	0,43
(0,77)	0,83	0,466
0,86	0,92	0,581
(0,96)	1,02	0,724
1,0	1,07	0,785
1,04	1,12	0,849
1,08	1,16	0,916
(1,16)	1,24	1,057
1,25	1,33	1,227
(1,30)	1,38	1,327
1,45	1,53	1,551
(1,50)	1,58	1,671
(1,52)	1,71	2,06
1,68	1,77	2,22
(1,74)	1,83	2,37
(1,88)	1,97	2,78
1,95	2,07	2,99

Pour la suite du calcul on utilisera la valeur de ΔC correspondant avec la section normalisée.

Le nombre total de conducteur dans une encoche sera :

$$n_c = n_{el} \cdot U_{nl}$$

La section d'une encoche est :

$$S_e = \frac{n_c \cdot d_i^2}{k_3}$$

k_3 est appelé coefficient de remplissage de l'encoche ; il est généralement 0,75.

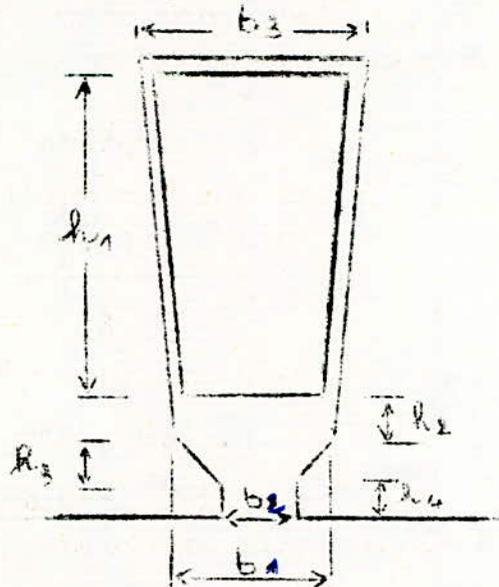
II.5 / Nombre de spires :

Le nombre de spires de l'enroulement statorique est donné par la relation :

$$w_1 = p \cdot q_1 \frac{U_{nl}}{a_1}$$

II.6 / Dimension de l'encoche du stator :

Comme nous l'avons signalé au début, les encoches du stator auront des parois trapézoïdale



La largeur b_2 de la fente de l'encoche doit être déterminée en tenant compte de la possibilité d'introduction de chaque partie active de la bobine.

On prendra :

$$b_2 = d_i + 1,4 \text{ mm}$$

d_i étant le diamètre du conducteur avec isolant.

Généralement pour les machines de moyenne puissance on a :

$$h_4 = 0,6 \text{ mm}$$

$$h_2 = 3 \text{ mm}$$

$$h_3 = 1 \text{ mm}$$

La largeur b_1 de l'encoche est déterminé par la relation :

$$b_1 = t_1 - \frac{B_g \cdot L_g \cdot t_1}{B_z \cdot L \cdot kc}$$

B_z représente l'induction dans les dents, kc le coefficient de remplissage

La grandeur :

$$\frac{B_g \cdot L_g \cdot t_1}{B_z \cdot L \cdot kc}$$

représente la largeur d'une dent.

II.7 / Raccourcissement du pas :

Les enroulements des machines à courant alternatif sont le plus souvent exécutés avec le pas raccourci.

Désignant par la valeur du pas relatif d'enroulement

$$\beta = \frac{y}{\tau} \text{ implique } y = \beta \cdot \tau$$

On définit ainsi le facteur de raccourcissement du pas :

$$k_p = \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{2}\right)$$

Ce raccourcissement permet d'éliminer les harmoniques supérieurs n°5 et 7.

Le facteur de raccourcissement correspondant au ν ème harmonique, est définie par :

$$k_{p\nu} = \sin\left(\frac{\nu \beta \pi}{2}\right)$$

Le facteur de raccourcissement correspondant au I^{ème} harmonique est k_{pI} . Les autres facteurs $k_{p3} \dots k_{pv}$ sont généralement inférieurs à k_{pI} .

On peut faire disparaître l'harmonique d'ordre ν . Il suffit de raccourcir le pas d'enroulement de $\frac{1}{\nu} \tau$.

En effet, l'équation $k_{pv} = \sin\left(\frac{\nu \beta \pi}{2}\right)$ devient

$$k_{pv} = \sin\left(\frac{\pi(\nu - I)}{2}\right) = 0$$

généralement, est compris entre 0,8 et 0,85.

II. 8 / Facteur de distribution

Le facteur de distribution du $\nu^{ième}$ harmonique, pour des enroulements à nombre entier d'encoches par pôle et par phase, avec q' encoches par pôles et q_I encoches par pôles et par phases est définie par la relation :

$$k_d = \frac{\sin \nu \frac{\pi}{2} \cdot \frac{q_I}{q'}}{q_I \sin \frac{\nu}{q'} \frac{\pi}{2}}$$

Comme $\frac{q_I}{q'} = \frac{I}{m}$ le facteur de distribution devient :

$$k_d = \frac{\sin \nu \frac{\pi}{2 \cdot m}}{q_I \sin \frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q_I}}$$

II. 9/ Facteur d'enroulement.

$$k_{OI} = k_d \cdot k_p$$

Le coefficient d'enroulement est définie comme étant le produit du coefficient de distribution par le facteur de raccourcissement du pas.

II. I0 / Calcul du flux de la machine.

Le flux de la machine est déterminé par la relation

$$\phi = \frac{k_e U_{IN} 10^8}{4 \cdot k_B \cdot f_I \cdot w_I \cdot k_{OI}}$$

II. II / Induction magnétique dans l'entrefer

$$B_g = \frac{\phi}{a_g \cdot l_g \cdot \tau}$$

II. I2 / Hauteur de la culasse du stator

$$h_{cs} = \frac{D_{ext} - D}{2} - h_{ZI}$$

D_{ext} représente le diamètre extérieur du stator. Il est généralement égale à 1,58 D.

II. I3 / Induction dans la culasse du stator.

Connaissant la hauteur de la culasse, on en déduit l'induction dans la culasse. Elle est définie par la relation

$$B_{cs} = \frac{\phi}{2h_{cs} \cdot L \cdot k_c}$$

II. 14 / Entrefer.

Dans les machines asynchrone, l'entrefer doit être le plus petit possible du fait qu'on doit avoir un facteur de puissance qui se rapproche le plus possible de l'unité et le courant de magnétisation doit être maintenu aussi faible que possible.

Mais un entrefer assez grand est également avantageux pour ce qui est des pertes supplémentaires dans le fer, produites par les pulsations du champ, et de la dispersion provoquée par le champs harmoniques supérieurs.

L'entrefer des machines asynchrones est donné en fonction du diamètre, du nombre de paires de pôles et de la puissance.

- Pour des moteurs ayant une puissance nominale comprise entre 1 et 30 Kw, l'entrefer est déterminé à partir des relations

$$\delta = 0,2 + \frac{D}{1000} \text{ (mm) pour } N=1500 \text{ tr/mn. -}$$

$$\delta = 0,3 + \frac{D}{666} \text{ (mm) pour } N= 3000 \text{ tr/mn.}$$

- Pour des puissances supérieures à 30 Kw

$$\delta = \frac{D}{1200} \left(1 + \frac{9}{2p} \right).$$

Si le régime de travail de la machine se rend difficile ou dur, il faut procéder à une augmentation de l'entrefer de 60 % environ.

III. Enroulements, encoches et dents du rotor.

III. I / Choix du nombre d'encoches du rotor.

En plus du couple principal, crée par les premiers harmoniques du flux et du courant, dans un moteur asynchrone prennent naissance plusieurs couples complémentaires ou parasites qui, dans des conditions déterminées peuvent perturber le fonctionnement du moteur ou même le rendre impossible.

On distingue les couples parasites suivants :

a- Les couples asynchrones créés par les harmoniques supérieurs des forces magnétomotrices y compris les harmoniques de denture.

b- Les couples synchrones qui prennent naissance à une certaine vitesse et pour un rapport déterminé entre le nombre d'encoches du stator et le nombre d'encoches du rotor.

c- Les couples de vibration dus également au rapport défavorable des nombres d'encoches du stator et du rotor.

Pour éviter tous ces couples parasites, le choix du nombre d'encoches rotoriques doit satisfaire à certaines conditions

- Parmi les harmoniques du stator qui créent des couples asynchrones, il faut noter les harmoniques de denture c'est à dire ceux qui, dans le cas général, sont de l'ordre :

$$\nu_{d_1} = k \frac{Z_1}{p} \pm 1 \quad (k \text{ entier positif quelconque}).$$

L'action des harmoniques de denture du stator et les couples créés par ces harmoniques peuvent être réduits considérablement par le choix du nombre d'encoches Z_2 .

Une analyse montre qu'il faut pour cela :

$$Z_2 \ll 1,25 Z_1$$

- dans le cas général, on entend par couple synchrone un couple qui prend naissance à une certaine vitesse du rotor par suite de l'interaction des harmoniques de même ordre du stator et du rotor c'est à dire pour $\nu_1 = \nu_2$ et pour une vitesse du rotor telle que ces harmoniques tournent au synchronisme. En particulier, une importance primordiale revient aux couples synchrones qui prennent naissance lors de l'existence des harmoniques de denture statoriques

et rotoriques de même ordre c'est à dire pour $\sqrt{d_1} = \sqrt{d_2}$.

Donc les couples asynchrones existent pour :

$$\frac{Z_1}{p} \pm 1 = \frac{Z_2}{p} \pm 1$$

ou pour :

$$Z_1 = Z_2 \quad \text{et} \quad Z_1 - Z_2 = \pm 2p$$

Pour cette raison, il faut éviter ces rapports entre le nombre d'encoches du stator et celui du rotor.

== Couples de vibrations :

Lors de la rotation du rotor, ses dents se déplacent par rapport aux dents du stator. Il en résulte des variations périodiques de l'induction magnétique dans les dents du stator et du rotor variations qui donnent naissance à différents phénomènes acoustiques tels que bourdonnements, sifflements, etc...

De plus, au point où les axes des dents du stator et du rotor coïncident, il apparaît, suivant la circonférence du stator une force d'attraction unilatérale entre le stator et le rotor.

Lors de la rotation du rotor, cette force se déplace à une vitesse déterminée faisant vibrer le rotor. Pour une certaine vitesse du rotor, ces vibrations peuvent se trouver en résonance avec les oscillations propres du rotor. Si ce phénomène s'amplifie fortement, il peut rendre le fonctionnement du moteur impossible.

L'analyse montre que les couples de vibrations prennent naissance lorsque :

$$Z_1 - Z_2 = \pm 1 \pm 2p$$

Certaines études ont montré que les relations entre les nombres d'encoches pour lesquelles :

$$Z_1 - Z_2 = \pm 2 \pm 4p$$

ne sont pas désirables.

Vu que $Z_1 = 2p \cdot n \cdot q_1$ et que q_1 est un nombre entier, Z_1 est un nombre paire.

Dans ce cas, la condition $Z_1 - Z_2 = \pm 1 \pm 2p$, nous amène à la conclusion que les nombres impaires d'encoches du rotor sont indésirables.

Pour éviter une augmentation des pertes différentielles dans les têtes d'enroulements, Z_2 doit satisfaire à la condition :

$$Z_2 \geq 0,7 Z_1$$

III.2 / Mesures prises pour éliminer les couples parasites :

Pour éliminer les couples parasites asynchrones de la façon la plus simple, il faut réduire les harmoniques de la force magnéto-motrice de l'enroulement statorique. A cette fin on utilise les enroulements à pas raccourci et à nombre entier d'encoches par pôle et par phase. Les enroulements à nombres fractionnaires d'encoches forment des systèmes de force magnéto motrice répartis de façon non synétrique suivant la circonférence du stator où contribuent à la naissance de bruit dans le moteur. Pour cette raison, les enroulements à nombre fractionnaire d'encoches sont rarement utilisés dans les machines asynchrones.

Le nombre d'encoches du rotor doit satisfaire la relation :

$$0,7 Z_1 \leq Z_2 \leq 1,25 Z_1$$

De même l'inclinaison des encoches du rotor ou du stator est un moyen très efficace de lutte contre les couples parasites asynchrones.

Ce procédé a également l'avantage d'améliorer la forme de la répartition du champ inducteur et, par là; réduire les harmoniques qui en résultent.

On prend généralement l'inclinaison des encoches du rotor égale au pas dentaire du stator ou l'inclinaison des encoches du stator égale au pas dentaire du rotor.

III.3 / Diamètre du rotor :

Le diamètre du rotor est calculé à partir du diamètre intérieur du stator et de la longueur de l'entrefer.

Il est déterminé à partir de la relation :

$$D_2 = D - 2 \delta$$

III. 4 / Pas dentaire :

C'est la valeur t_2 donnée par la relation :

$$t_2 = \pi \frac{D_2}{Z_2}$$

III.5 / Courant dans la barre et dans l'anneau du rotor :

Pour les machines asynchrones à rotor en court-circuit, les courants dans l'anneau et dans la barre sont donnés par les expressions suivantes :

- Courant dans la barre :

$$I_b = I_2 = k_I \cdot I_{1N} \cdot \frac{6W_1 \cdot k_{ol}}{Z_2}$$

où k_I est un coefficient donné en fonction du facteur de puissance :

$$k_I = 0,83 \cdot \cos \varphi + 0,20$$

- Courant dans l'anneau

$$I_a = I_b \cdot \frac{1}{2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}}$$

en posant :

$$\Delta = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}$$

on a :

$$I_a = I_c \frac{1}{\Delta}$$

III.6 / Section de l'anneau et de la barre:

Connaissant les courants, on pourra facilement déterminer les sections de l'anneau et des barres par la relation :

$$S = \frac{I}{\Delta C}$$

• $S_a = \frac{I_a}{\Delta a}$

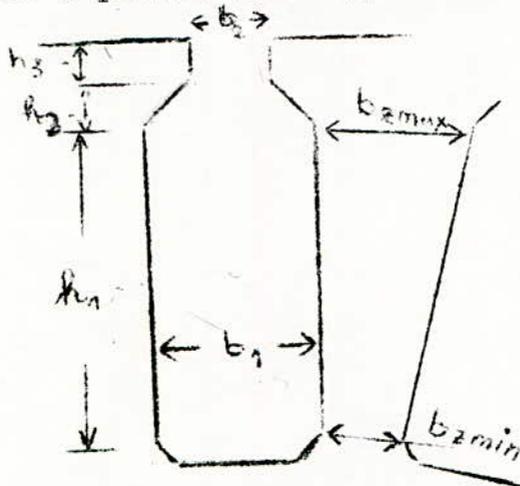
• $S_b = \frac{I_b}{\Delta b}$

Pour les barres, la densité de courant varie entre 2,2 et 4,5 A/mm².

Pour les anneaux, elle a des valeurs comprises entre 0,65 et 0,8 Δb.

III. 7 / Dimensions des encoches du rotor.

Pour l'exécution des encoches du rotor, on les choisit généralement à parois rectangulaires.



Pour les moteurs de moyenne puissance, on prend $b_2 = 1,5 \text{ mm}$. La longueur de gorge h_3 varie généralement entre 0,5 et 1,5 mm. La largeur de l'encoche b_I aura des valeurs allant de 3,5 à 6 mm, tandis que la hauteur h_I de l'encoche sera comprise entre 25 et 45 mm.

Compte tenu de la forme de l'encoche, on pourra calculer sa section à partir de la relation:

$$S_e = S_b = h_I \cdot b_I + 0,5(b_I^2 + b_2^2)$$

III. 8 / Culasse du rotor.

-Hauteur de la culasse du rotor:

$$h_{cr} = \frac{D_2 - D_A + D_A/6}{2} - h_{Z2}$$

D_A représente le diamètre de l'arbre. Pour les moteurs de puissance allant jusqu'à 250 kW, on prendra $D_A = 0,3D$.

h_{Z2} représente la hauteur de la dent.

-Induction dans la culasse:

$$B_{cr} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{cr} \cdot l_2 \cdot k_c}$$

IV. Courants magnétisants.

Le courant de magnétisation représente par définition la composante active du courant de fonctionnement à vide du moteur.

Il est déterminé par la relation:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{tot.}}{C, 9. m. w_I \cdot K_{OI}}$$

où $F_{tot.}$ représente la force magnétomotrice totale composée des forces magnéto-motrices :

- de l'entrefer
- des dents du stator
- des dents du rotor
- de la culasse du stator
- de la culasse du rotor

$$F_{tot} = F + F_{zI} + F_{z2} + F_{cr} + F_{cs}$$

IV. I / Force magnéto-motrice de l'entrefer.

Elle est définie par la relation:

$$F_{\delta} = I, 6. B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta}$$

k_{δ} est appelé coefficient d'entrefer. Il tient compte de l'augmentation des longueurs des lignes d'induction dans l'entrefer.

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2}$$

$k_{\delta 1}$ étant le coefficient d'entrefer du stator et $k_{\delta 2}$ celui du rotor.

$$k_{\delta 1} = \frac{T_1}{T_1 - \gamma \cdot \delta} \quad \text{et} \quad k_{\delta 2} = \frac{T_2}{T_2 - \gamma \cdot \delta}$$

$$\text{avec } \gamma = \frac{(b/\delta)^2}{5 + (b/\delta)}$$

b étant l'ouverture de l'encoche.

IV.2 / Force magnétomotrice des dents du stator :

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1}$$

h_{z1} étant la hauteur de la dent

H_{z1} étant l'intensité du champ.

Comme les dents sont à parois parallèles, l'induction est la même en n'importe quel point dans la zone des dents.

IV.3 / Force magnétomotrice dans les dents du rotor :

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2}$$

Comme les dents sont, pour le rotor, à parois trapézoïdales, l'induction ne sera pas la même dans la zone des dents, dans ce cas on calculera les inductions :

- à la base de la dent :

$$B_{z2\text{mini}} = \frac{B\delta \cdot t_2 \cdot l\delta}{b_{z2\text{max}} \cdot l_2 \cdot k_c}$$

- au sommet de la dent :

$$B_{z2\text{max}} = \frac{B\delta \cdot t_2 \cdot l\delta}{b_{z2\text{mini}} \cdot l_2 \cdot k_c}$$

- au milieu de la dent :

avec $b_{z2\text{moy}} = \frac{b_{z2\text{max}} + b_{z2\text{mini}}}{2}$

on a :

$$B_{z2\text{moy}} = \frac{B\delta \cdot t_2 \cdot l\delta}{b_{z2\text{moy}} \cdot l_2 \cdot k_c}$$

Pour chacune de ces inductions correspond une intensité du champ $H_{z2\text{max}}$, $H_{z2\text{mini}}$, $H_{z2\text{moy}}$.

L'intensité du champ dans la zone des dents du rotor est :

$$H_{z2} = \frac{1}{6} (H_{z2\text{mini}} + H_{z2\text{max}} + 4 H_{z2\text{moy}})$$

A partir de ces trois forces magnétomotrices on calcule le coefficient de saturation :

$$K_z = \frac{F_{z1} + F_{z2} + F_\delta}{F_\delta}$$

De cette valeur K_z on détermine à partir du graphique 4.2, le coefficient a_δ

On rectifie les valeurs trouvées précédemment, à savoir les inductions, les forces magnétomotrices et les intensités du champ dans l'entrefer, dans les dents du stator et du rotor par le rapport de la valeur de a_δ prise au début et celle trouvée. On recalculera K_z de la même façon.

IV.4 / Force magnétomotrice dans la culasse du stator et du rotor :

Elles sont déterminées à partir de la relation :

$$F_{C(s,r)} = \mathcal{Y} L_{C(s,r)} \cdot H_{C(s,r)}$$

- \mathcal{Y} est un coefficient qui tient compte de la variation de l'induction magnétique le long des lignes d'induction.

\mathcal{Y} est représenté sur la figure 4.3 en fonction de l'induction de la culasse.

- $L_{C(s,r)}$ sont les longueurs moyennes dans les lignes d'induction pour le stator et le rotor.

λ pour le stator :

$$L_{cs} = \frac{\pi (D_{ext} - h_{cs})}{2p}$$

D_{ext} représente le diamètre extérieur du stator/

λ pour le rotor

$$L_{cr} = \frac{\pi (D_a + h_{cr})}{2p}$$

D_a = diamètre de l'arbre = 0,3 D

Les valeurs de l'intensité du champ en fonction de l'induction sont représentées sur le tableau 4-1.

Intensités du champ en fonction de l'induction

$B_{[T]}$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,53	1,58	1,61	1,64	1,67
0,5	1,71	1,75	1,79	1,83	1,87	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07
0,6	2,11	2,16	2,21	2,26	2,31	2,36	2,41	2,46	2,51	2,56
0,7	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,87	2,93	2,99	3,06	3,12
0,8	3,18	3,24	3,30	3,37	3,44	3,52	3,60	3,69	3,78	3,87
0,9	3,97	4,07	4,17	4,27	4,37	5,47	5,48	4,69	4,80	4,91
1	5,02	5,14	5,27	5,41	5,55	5,70	5,85	6,00	6,15	6,31
1,1	6,47	6,64	6,82	7,01	7,20	7,39	7,59	7,79	8,00	8,21
1,2	8,43	8,66	8,91	9,18	9,46	9,76	10,1	10,4	10,7	11,0
1,3	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8	14,3	14,8	15,3
1,4	15,8	16,4	17,1	17,8	18,6	19,5	20,5	21,5	22,6	23,8
1,5	25,0	26,4	27,9	29,5	31,1	32,8	34,6	36,6	38,8	41,2
1,6	43,7	46,3	49,1	52,2	55,3	58,8	62,3	66	69,8	73,7
1,7	77,8	82,0	86,3	90,7	96,3	101	106	111	116	122
1,8	128	134	142	146	152	159	166	173	180	188
1,9	197	206	216	226	236	246	256	268	282	296
2	310	325	343	365	390	420	455	495	545	595
2,1	655	725	800	880	960	1040	1120	1200	1280	1360
2,2	1440	1520	1600	1680	1760	1840	1920	2000	2080	2160
2,3	2240	2320	2400	2480	2560	2640	2720	2800	2880	2960
2,4	3000	3120	3200	3280	3360	3440	3520	3600	3680	3760

pour $B > 2,15$, $B = f(H)$ devient linéaire.

$$H = \frac{B - 2,02}{1,256} \cdot 10^4$$

On pourra ainsi calculer le courant de magnétisation d'après la relation donnée au début du paragraphe.

On donne aussi le courant de magnétisation en fonction du courant nominal (en %)

$$I \% = \frac{I}{I_{1N}} \cdot 100$$

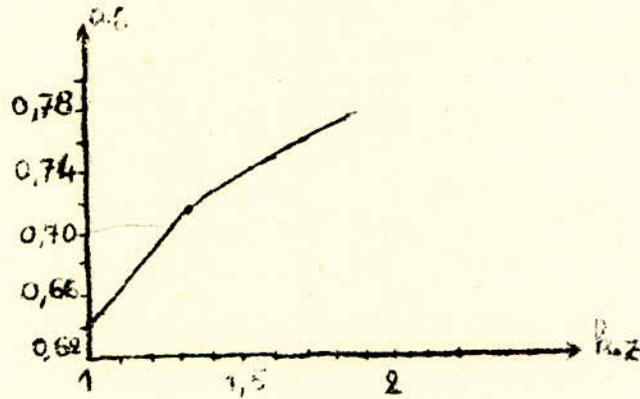


fig 4.2

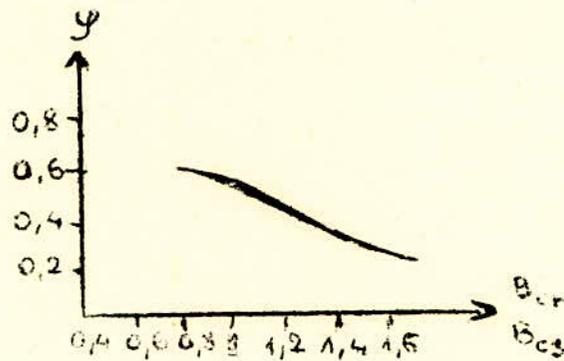


fig. 4.3

V . Paramètres électriques du moteur.

On calculera les paramètres électriques du moteur dans le but de pouvoir déterminer les différentes caractéristiques de fonctionnement de la machine asynchrone.

V . I/ Résistance statorique.

$$R_s = \frac{L_1}{n_{el} \cdot S_c \cdot a_1}$$

L_1 étant la longueur totale de l'enroulement statorique.

$$L_1 = 2 \cdot W_1 \cdot l_{cs}$$

l_{cs} représente la longueur moyenne du conducteur statorique.

$$l_{cs} = l_d + l_{fl}$$

l_d représente la longueur du conducteur qui se trouve dans l'encoche.

et l_{fl} la longueur de la partie frontale d'une demie spire. Elle est calculée à partir de la relation:

$$l_{fl} = K_{pl} \cdot \tau_{y1} + 2 \cdot B$$

K_{pl} et B sont des coefficients empiriques.

avec

$$\tau_{y1} = y_1 \frac{\pi (D + h)}{Z_1}$$

y_1 et h sont respectivement le pas raccourci et la hauteur de la dent.

On donne aussi la résistance statorique en unité réduite:

$$R_{s.ré.} = R_s \frac{I_{1N}}{U_N}$$

V . 2 / Résistance rotorique.

Elle sera calculée à partir de la relation:

$$R_r = R_b + \frac{2 \cdot R_a}{2 \cdot \sin \frac{\pi p}{Z_2}}$$

où R_a et R_b représentent la résistance des anneaux et des barres.

$$R_a = \epsilon_{075} \frac{\pi (D - a) 10^{-2}}{z_2 \cdot S_a} \quad \text{et} \quad R_b = \epsilon_{075} \frac{L_2 \cdot 10^{-2}}{S_b}$$

ϵ_{075} sera donné en m / ohm.mm², L₂, D et "a" en mm.
 La grandeur "a" est une des dimensions de l'anneau. Dans le cas d'un anneau à section rectangulaire, on prendra pour longueur "a" de l'anneau la hauteur de la dent augmentée de 3mm. comme on connaît la section, on pourra déterminer la largeur "b".

Si on pose : $M = \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{01})^2}{z_2}$ le rapport de transformation de la machine, la résistance rotorique ramenée au stator sera :

$$R_{r.ra} = R_r \cdot M$$

en unité réduite, elle sera :

$$R_{r.ra.re} = R_{r.ra} \cdot \frac{I_{1N}}{U_N}$$

V.3 / Permeance et réactance du stator.

V.3.1 / Permeance des encoches .

Elle se détermine à partir de la relation :

$$\lambda_{e1} = \frac{h_1}{3 \cdot b_1} k_{\beta} + \left(\frac{h_2}{b_1} + \frac{3h_3}{b_1 + 2b_2} + \frac{h_4}{b_2} \right) k'_{\beta}$$

avec : $k_{\beta} = \frac{1 + 3 \cdot k'_{\beta}}{4}$ et $k'_{\beta} = \frac{1 + 3 \beta}{4}$

Les coefficients k_{β} et k'_{β} caractérisent le raccourcissement du pas.

V.3.2 / permeance différentielle.

Elle est donnée par :

$$\lambda_{d1} = 0,9 \frac{t_1 \cdot (q_1 \cdot k_{01})^2 \cdot e_{d1} \cdot k_{e1}}{\xi \cdot k_{\beta}} \sigma_{d1}$$

k_{e1} est un coefficient qui caractérise l'ouverture de l'encoche

$$k_{e1} = 1 - 0,033 \cdot \frac{b_2^2}{t_1}$$

C_{d1} est appelé coefficient de compensation du flux magnétique dans la tête des sections des enroulements.

V.3.3/ Perméance frontale.

La relation qui permet de déterminer la perméance frontale est:

$$\lambda_{f1} = 0,34 \frac{q_1}{L \delta} (l_{f1} - 0,64 \beta \cdot \tau)$$

On calculera la réactance du stator par la relation:

$$x_1 = 0,158 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{1}{pq_1} (\lambda_{e1} + \lambda_{d1} + \lambda_{f1})$$

En unité réduite

$$X_{I.ré} = X_I \frac{I_{1N}}{U_{1N}}$$

V. 4 / Permeance et reactance du rotor :

V. 4. 1 / Permeance des encoches :

$$\lambda_{e2} = \left(\frac{h_1}{3b} + \frac{3h_2}{b_1 + 2b_2} \right) + \frac{h_3}{b_2}$$

V. 4. 2 / Permeance différentielle :

$$\lambda_{d2} = 0,9 \frac{t_2 \left(\frac{z_2}{3p} \right)^2 C_{d2} \cdot k_{e2}}{\delta \cdot kg} \cdot C_{d2}$$

V. 4. 3 / Perméance frontale.

$$= 2,3 \frac{(D - a)}{Z_2 L_2 \Delta^2} \log \frac{4,7 (D - a)}{a + 2b}$$

La réactance du rotor est :

$$X_2 = 7,9 f \cdot L_2 (\lambda_{e2} + \lambda_{d2} + \lambda_{f2})$$

Réactance ramenée au stator.

$$X_{2.ra} = X_2 \cdot M$$

Réactance réduite.

$$X_{2.ra.ré} = X_{2.ra} \frac{I_{1N}}{U_{1N}}$$

La réactance utile par phase de l'enroulement primaire est définie par la relation.

$$X_{I2} = \frac{U_N - I_\mu \cdot X_I}{I_\mu}$$

Réactance utile en unité réduite.

$$X_{I2.ré} = X_{I2} \frac{I_N}{U_N}$$

V. 5 / Influence de l'inclinaison des encoches sur les réactances

$$\sigma_{ck} = 1 + 0,4I \left(\frac{2p \cdot t_2}{\pi D} \right)^2 \cdot \epsilon$$

avec $\epsilon = \frac{U_N}{I_\mu \cdot X_I}$

σ_{ck} : coefficient qui tient compte de l'inclinaison des encoches du stator ou du rotor.

Le rapport $\frac{\pi D}{t_2}$ définit l'angle d'inclinaison des encoches.

On aura donc augmentation des réactances X_I et $X_{2.ra}$

dûe à l'inclinaison des encoches du stator.

$$X_I = X_I \sigma_{ck}$$

$$X_{2.ra} = X_{2.ra} \cdot \sigma_{ck}$$

VI. Pertes mécaniques et pertes dans l'acier.

Les pertes dans l'acier se composent de :

- Pertes dans le fer de la culasse du stator.
- Pertes dans le fer des dents du rotor.
- Pertes superficielles dans le rotor

Ou negligera les pertes superficielles et par pulsation dans les dents du stator, de même que les pertes dans la culasse et les dents du rotor du fait qu'on a une faible fréquence dans le rotor.

VI. I / Pertes principales dans le fer de la culasse du stator

Elles sont déterminées à partir de la relation

$$P_{cs} = k_d \cdot p_{cs} \cdot M_{cs} \cdot 10^{-3} \text{ (kW)}$$

Pour les moteurs de moyenne puissance $k_d = 1,6$
 p_{cs} representent les pertes volumiques.

$$P_{cs} = \frac{p_{10}}{50} \cdot (B_c)^2 \left(\frac{f}{50}\right)^\alpha, \quad \alpha = 1,3 \text{ à } 1,5$$

$\frac{p_{10}}{50}$ = pertes spécifiques dans l'acier. Dependent du materiel utilisé. On prendra $\frac{p_{10}}{50} = 3,3 \text{ W/kg}$.

M_{cs} = poids de la culasse du stator. Il est calculé à partir de de la relation :

$$M_{cs} = \gamma h_{cs} \cdot L \cdot k_c \cdot l_{cs} \cdot 2p \cdot 10^{-3} \text{ (kg)}$$

avec γ = densité volumiques. Elle dépend du materiel utilisé.

Pour la culasse du stator, de même que pour le rotor, ou utilisé un mélange d'acier et de silicium. La densité volumique depend du pourcentage de silicium compris dans l'acier.

Pour 0,8 à 1,8 % de silicium, $\gamma = 7,8 \text{ g/cm}^3$

VI. 2 / Pertes principales dans le fer des dents du stator.

Elles se calculent de la même façon que la culasse

$$P_{zs} = k_d \cdot p_{zs} \cdot M_{zs} \cdot 10^{-3} \text{ (kW).}$$

Pour les moteurs de moyenne puissance. $k_d = 1,8$.

Le poids des dents est :

$$M_{zs} = \gamma Z_I h_{zs} b_{zImoy} \cdot L \cdot k_c \cdot 10^{-3} \text{ kg.}$$

$$p_{zs} = \frac{p_{IO}}{50} \cdot (B_{zI \text{ moy}})^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}$$

VI. 3 / Pertes superficielle dans le fer des dents du rotor.

Elles se déterminent à partir de l'équation :

$$P_{sup.r} = 2 \cdot p \cdot \tau \frac{t_2 - b_2}{t_2} L \cdot p_{sup.r} \cdot 10^{-7} \text{ (kW).}$$

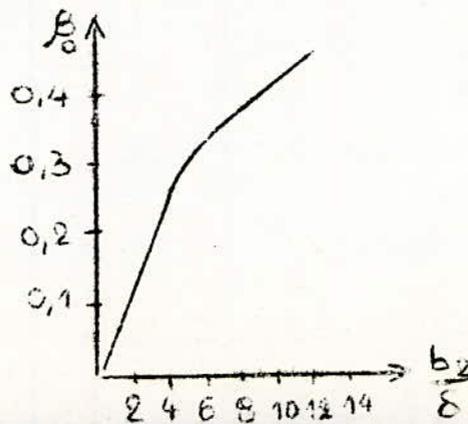
$p_{sup.r}$ représentent la densité de perte superficielle.

$$p_{sup.r} = 0,5 K_0 \left(\frac{Z_I N_I}{10.000}\right)^{1,5} (B_0 \cdot t_1 \cdot 10)^2 \text{ W/m}^2$$

B_0 est l'induction fictive dans l'entrefer. On la calcule par la relation

$$B_0 = B_0 \cdot k_g \cdot B_g$$

B_0 est un coefficient que tient compte de l'ouverture des encoches. Il est donné en fonction de rapport $\frac{b_2}{\delta}$



VI. 4 / Pertes pour pulsation du flux dans les dents du rotor.

On les calcule à partir de l'équation :

$$P_{\text{puls}} = 0,11 \left(\frac{Z_I N_I}{1000} B_{\text{puls}} \right)^2 \cdot M_{\text{zr}} \cdot 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

B_{puls} représentant l'induction de pulsation et qui est calculée par la relation :

$$B_{\text{puls}} = \frac{\gamma_c \cdot \delta}{2 \cdot t_2}$$

où γ_c est appelée coefficient d'augmentation de la reluctance pour les pertes de pulsation dues à l'ouverture des encoches.

$$\gamma_c = \frac{\left(\frac{b_2}{\delta} \right)^2}{(5 + B_2) \cdot \delta}$$

$M_{\text{zr}} = \gamma \cdot Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \text{ moy} \cdot L_2 \cdot k_c \cdot 10^{-3} \quad (\text{kg})$ est le poids des dents du rotor.

VI. 5 / Pertes principales dans le fer.

Elles sont composées des pertes dans le fer de la culasse et des dents du stator

$$P_p = P_{\text{cs}} + P_{\text{zs}}$$

VI. 6 / Pertes supplémentaires dans le fer,

C'est la somme des pertes supplémentaires et par pulsation dans les dents du rotor.

$$P_{\text{sup.}} = P_{\text{sup.r}} + P_{\text{puls.r}}$$

Les pertes totales dans le fer seront donc :

$$P_{\text{fer}} = P_p + P_{\text{sup.}}$$

VI. 7 / Pertes mécaniques.

On utilise la relation

$$P_{\text{mec}} = K_T \left(\frac{N_I}{1000} \right)^2 \left(\frac{D}{10} \right)^3 \cdot 10^{-3} \quad (\text{kW})$$

K_T varie suivant le nombre de paires de pôles et le diamètre extérieur du stator.

pour $p = 1$

$$K_T = 6 \text{ si Dext } 25 \text{ cm}$$

$$K_T = 5 \text{ si Dext } 25 \text{ cm}$$

pour $p = 2$.

$$K_T = 7 \text{ si Dext } 25 \text{ cm}$$

$$K_T = 6 \text{ si Dext } 25 \text{ cm.}$$

C H A P I T R E . - II -

Equations et organigramme de calcul.

Nous exposerons dans ce chapitre l'organigramme qui permettra de définir notre moteur ainsi que le choix de certaines grandeurs.

Nous avons divisé le calcul en 8 parties :

- I - Calcul des dimensions principales.
- 2 - Calcul du stator.
- 3 - Calcul du rotor.
- 4 - Courant magnetisant.
- 5 - Paramètres électriques du moteur.
- 6 - Pertes.
- 7 - Caracteristique de service.
- 8 - Caracteristique de démarrage du moteur.

II. I./ Dimensions principales de la machine.

Comme vous avez pu le remarquer dans le chapitre précédent, c'est à partir des grandeurs L , D , A et B_g qu'on a appelé grandeurs principales de la machine, que découlent presque toutes les autres grandeurs. De ce fait, le choix du moteur dépendra de choix de ces grandeurs.

Des caractéristiques $D = f (PS)$ de la fig. II, nous déterminerons les relations liant le diamètre à la puissance pour chaque nombre de paire de pôles. On se limitera aux machines ayant de 1 à 3 paires de pôles .

Ces équations sont :

$$\begin{array}{ll} \text{pour } p = 1 & D = 7 \cdot P_s^{0,285} \\ p = 2 & D = 9 \cdot P_s^{0,272} \\ p = 3 & D = 31,6 \cdot P_s^{0,251} \end{array}$$

Auparavant, on déterminera d'abord PS d'après la relation donnée au paragraphe I.I à savoir :

$$PS = \frac{k_E P_N}{\eta_N \cdot \cos \varphi_N}$$

k_E étant donné en fonction du nombre de paire de pôles la relation qui lie k_E à p est déterminée à partir de la caractéristique $k_E = f (p)$ donnée en fig. I-2.

$$k_E = 0,98 - 5P \cdot 10^{-3}$$

Connaissant le diamètre intérieur du stator, on pourra facilement déterminer le pas pôle du moteur

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2 \cdot p}$$

et donc l'induction dans l'entrefer B_g et la densité linéaire du courant A qui sont donnés en fonction du pas pôle sur la fig. I-4.

Les relations donnant A et B_{δ} sont:

$$\begin{aligned} \text{pour } p=1 \quad A &= 0,485 \cdot \tau_p^{0,609} & ; \quad B_{\delta} &= 0,085 \log \tau_p + 0,42 \\ p=2 \quad A &= 95 \tau_p^{0,453} & ; \quad B_{\delta} &= 0,064 \log \tau_p + 0,56 \\ p=3 \quad A &= 128,5 \tau_p^{0,379} & ; \quad B_{\delta} &= 0,054 \log \tau_p + 0,60 \end{aligned}$$

La connaissance de P_s , A , B_{δ} , et D nous permettra de calculer la longueur idéale de la machine par la relation déjà donnée au chapitre précédent:

$$L_{\delta} = \frac{6,1 \cdot 10^7 \cdot P_s}{a \cdot k_B \cdot k_{01} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot D^2 \cdot N}$$

Etant donné qu'on ne tiendra pas compte de la ventilation, on aura $L_{\delta} = L_1 = L$. Le facteur de géométrie est:

$$\lambda = \frac{L_{\delta}}{\tau_p}$$

La puissance P_s est donnée en kVar, A en A/cm, B_{δ} en T, D en cm, N en tr/mn et L en cm.

Nous proposons de faire varier le diamètre trouvé à partir de la relation de ± 3 cm avec un pas de 0,5 cm et d'exécuter toutes les opérations pour les différents diamètres mais on veillera cependant à ce que le coefficient de géométrie ne dépasse pas les limites :

$$0,7 \leq \lambda \leq 1,5$$

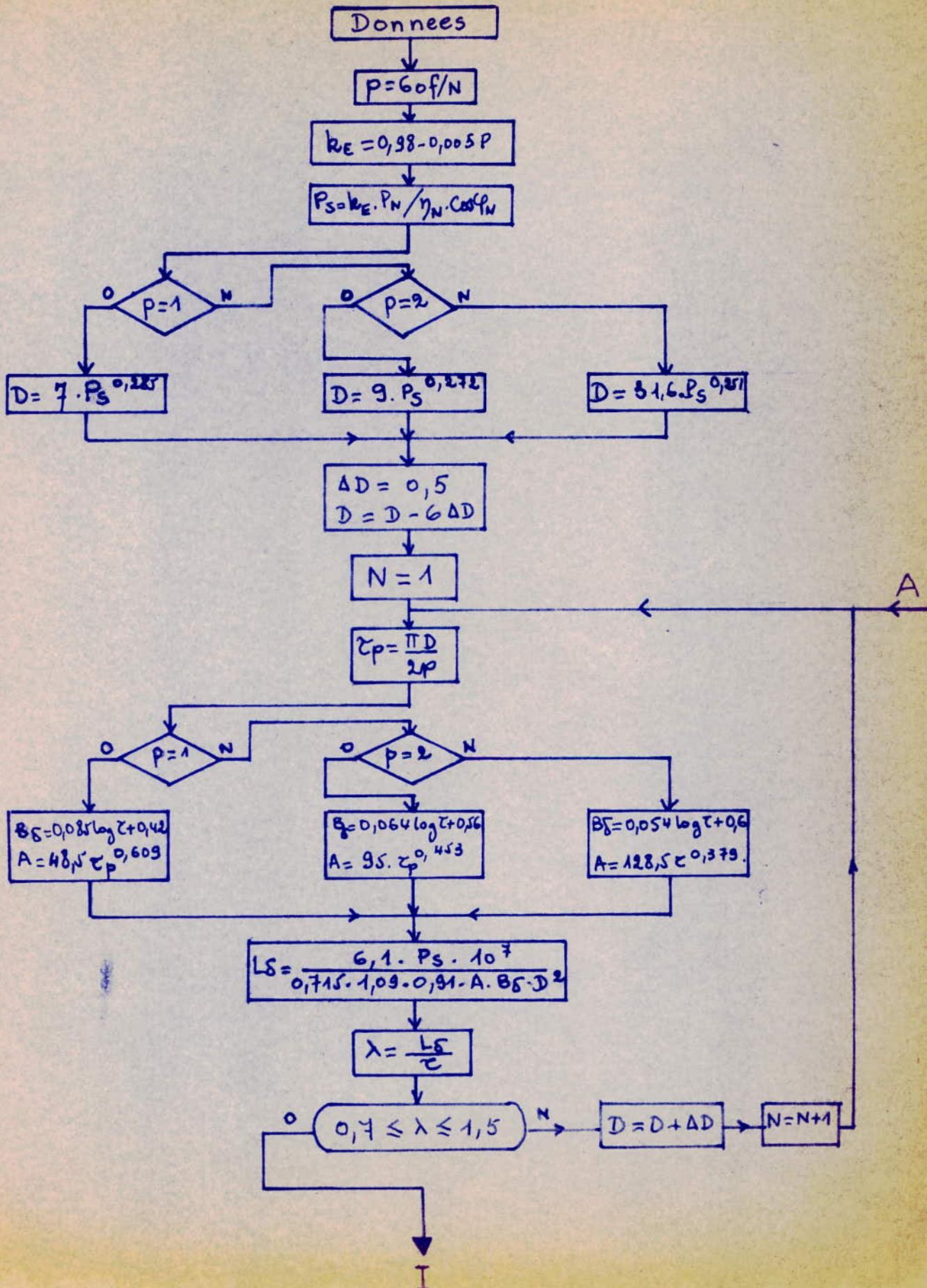
Pour ce calcul des dimensions principales, l'expérience montre qu'on peut choisir :

- pour coefficient de pôles théorique: $a_{\delta} = 0,715$
- la valeur du coefficient de forme de l'induction est généralement très voisine de 1,09.
- le coefficient d'enroulement k_{01} sera pris égal à 0,92.

Dans le cas où le coefficient de géométrie dépasse les limites, on n'exécutera pas la suite du calcul pour cette valeur du diamètre.

Connaissant toutes les équations de calcul, on pourra ainsi dresser l'organigramme de calcul des dimensions principales.

Dimensions Principales



II. 2 / Enroulement, encoches et dents du stator.

Pour l'exécution de l'enroulement statorique, on choisira un enroulement à une (I) seule branche, ayant 3 encoches par pôle et par phase.

Il est bien sûr évident que le nombre de conducteurs efficaces doit être entier. Pour cela, le programme de calcul doit être écrit de telle sorte que, lors de l'exécution des calculs, on arrondira le nombre de conducteurs au demi chiffre supérieur.

On introduira dans le programme de calcul des tests de contrôle permettant le choix de la section normalisée du conducteur mais on se limitera aux valeurs comprises entre 0,64 et 3 mm².

Pour éviter que la section soit supérieure à 3 mm², on la divisera en un nombre n_{ce} de conducteurs élémentaires.

On prendra $n_{ce} = 3$

La densité moyenne du conducteur statorique sera prise égale à 5 A/mm².

Pour le calcul des dimensions des encoches, on devra fixer l'induction magnétique dans les dents. Elle est généralement comprise entre 1,4 et 1,7 T. On prendra $B_{z1} = 1,65$ T.

Etant donné que les encoches du stator auront une forme trapézoïdale, les dents seront donc à parois parallèles. La largeur de la dent sera donc la même en tout point dans la zone des dents. De ce fait, la largeur sera déterminée à partir de la relation:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot I_{\delta}}{B_{z1} \cdot L \cdot k_c}$$

On aura, par conséquent, pour dimension de la petite base de l'encoche:

$$b_{e1} = t_1 - b_{z1}$$

Connaissant la section de l'encoche (cf. II.4), on pourra écrire

$$S_e = \left(\frac{b_{e3} + b_{e1}}{2} \right) \cdot h_{e1}$$

b_{e3} et h_{e1} représentant respectivement la grande base et la hauteur de l'encoche.

Le pas dentaire au sommet de la dent sera donc:

$$t_1' = \frac{\pi (D + 2h_{z1})}{Z_1}$$

Donc la grande base de la dent sera:

$$b_{e3} = t_1' - b_{e1} = \frac{\pi (D + 2h_{z1})}{Z_1} - b_{z1}$$

En remplaçant b_{e3} par sa valeur dans l'équation de la section nous aurons:

$$S_e = \left(\frac{\pi (D + 2h_{z1})}{2 Z_1} - \frac{b_{z1}}{2} + \frac{b_{e1}}{2} \right) \cdot h_{e1}$$

ce qui donne, en tenant compte du fait que:

$$h_{z1} = h_{e1} + h_{e2} + h_{e3}$$

$$S_e = \left(\frac{\pi D}{2 \cdot Z_1} + \frac{2 \pi h_{z1}}{2 Z_1} - \frac{b_{z1}}{2} + \frac{b_{e1}}{2} \right) \cdot h_{e1}$$

Connaissant la section de l'encoche (cf. II.4), on pourra écrire

$$S_e = \left[\frac{t_1' - b_{z1} - b_{e1}}{2} + \frac{\pi}{Z_1} (h_{e1} + h_{e2} + h_{e3}) \right] h_{e1}$$

comme $t_1' - b_{z1} = b_{e1}$, l'équation devient:

$$S_e = \left[b_{e1} + \frac{\pi}{Z_1} (h_{e1} + h_{e2} + h_{e3}) \right] \cdot h_{e1}$$

On obtient l'équation du second degré suivante:

$$\frac{\pi}{Z_1} h_{e1}^2 + \left[b_{e1} + \frac{\pi}{Z_1} (h_{e2} + h_{e3}) \right] h_{e1} - S_e = 0$$

La résolution de cette équation nous permettra de déterminer h_{e1} ; comme nous obtiendrons 2 racines de signe contraire, nous prendrons la solution positive.

$$h_{e1} = \frac{- \left[b_{e1} + \frac{\pi}{Z_1} (h_{e2} + h_{e3}) \right] + \sqrt{\left[b_{e1} + \frac{\pi}{Z_1} (h_{e2} + h_{e3}) \right]^2 - \frac{4 \pi \cdot S_e}{Z_1}}}{\left(\frac{2 \pi}{Z_1} \right)}$$

La connaissance de la hauteur de la partie active de l'encoche nous permettra de déterminer la hauteur de la dent:

$$h_{z1} = h_{e1} + h_{e2} + h_{e3} + h_{e4}$$

A partir des dimensions des encoches et des dents du stator, on pourra facilement déterminer les inductions dans les différentes parties du stator.

En ce qui concerne l'épaisseur de l'entrefer, qui est calculée à partir des relations du §II.4, on introduira dans notre programme des tests de contrôle de la puissance et de la vitesse.

- si la puissance est $\geq 30\text{kW}$:

$$\delta = \frac{D}{1200} \left(1 + \frac{9}{2.p} \right) \quad \text{mm}$$

- si la puissance est $\leq 30\text{kW}$

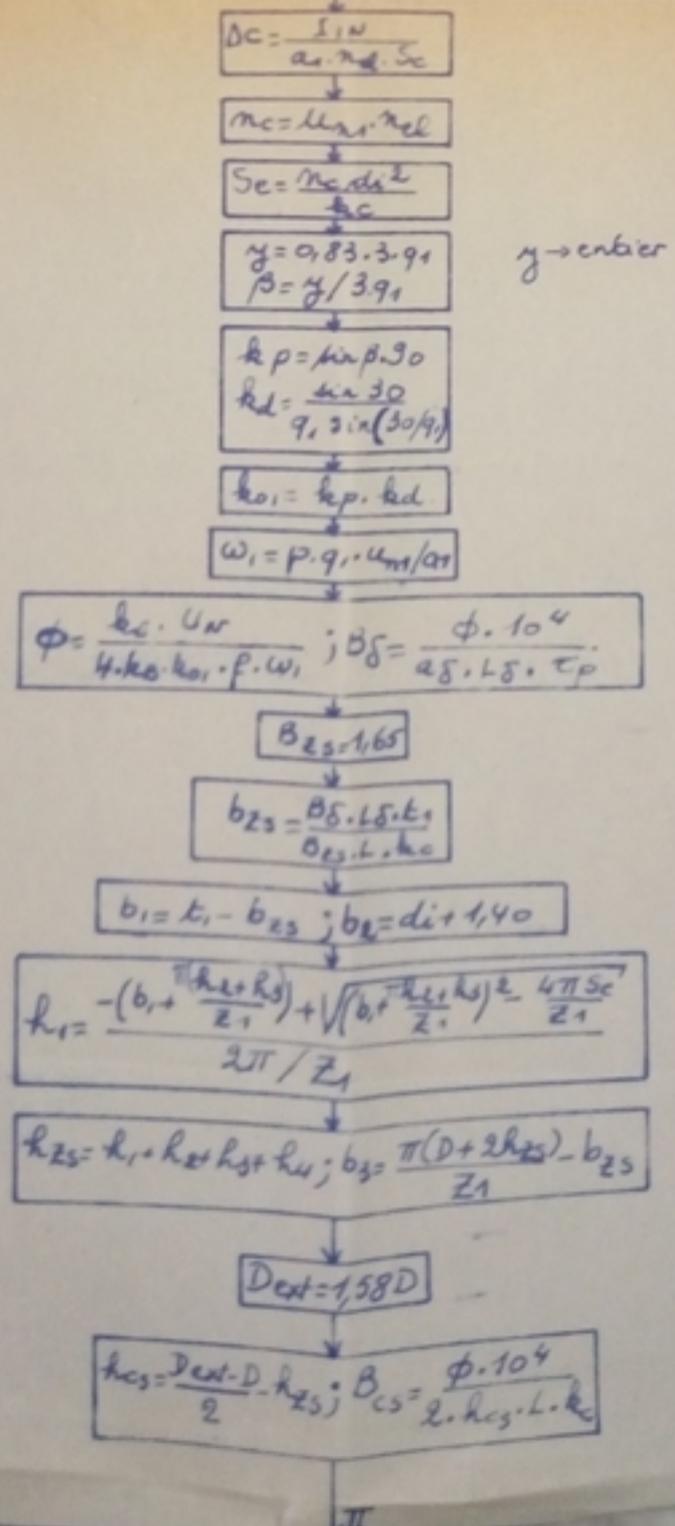
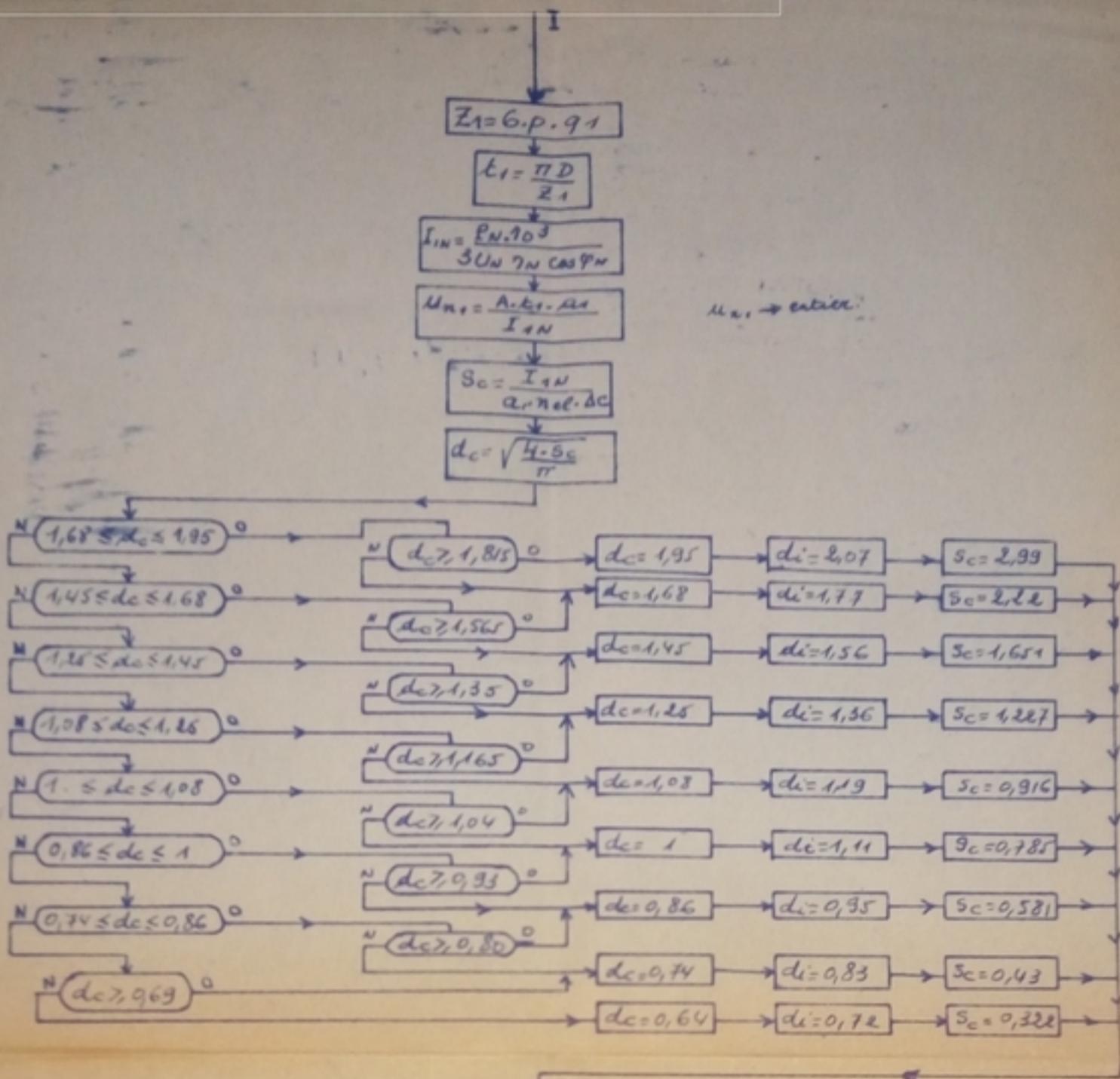
-pour $N = 3000 \text{ tr/mn}$

$$\delta = 0,3 + \frac{D}{666} \quad \text{mm}$$

- pour $N = 1500 \text{ tr/mn}$

$$\delta = 0,2 + \frac{D}{1000} \quad \text{mm}$$

Enroulement, Encoches et dents du stator



II / Enroulement, encoches et dents du rotor.

1./Pour éliminer les couples parasites, certains rapports entre Z_1 et Z_2 sont à éviter. De ce fait :

- On exécutera le stator avec des encoches inclinées.

- On devra, en tous cas, éviter d'avoir $Z_1 = Z_2$

- On écrira le programme de sorte à ce que Z_2 soit pair

Comme on a choisi pour notre moteur $q_1 = 3$, en prenant $Z_2 = 1,2 Z_1$, la condition :

$$Z_1 - Z_2 \neq \pm 2 \pm 4p$$

sera satisfaite.

2. / Pour diminuer la distorsion des lignes de forces magnétiques dans les parties frontales, on prendra :

$$L_2 = LD + 0,5 \text{ cm}$$

3. / Pour le calcul des sections des barres et des anneaux les densités de courants auront les valeurs suivant:

$$\Delta b = 3,5 \text{ A/mm}^2$$

$$\Delta a = 2,5 \text{ A/mm}^2$$

4. / Dimensions des encoches.

On prendra la section des encoches du rotor égale à section d'une barre. Comme les encoches sont à parois parallèles on aura :

$$S_{er} = S_b = h_{er} \cdot b_{er} l$$

Le pas dentaire à la base de la dent sera :

$$t_2 = \frac{\pi (D - 2h_{zr})}{Z_r}$$

ou

$$t'_2 = \frac{\pi D}{2 \cdot Z_r} - \frac{2\pi}{Z_r} h_{zr}$$

Compte tenu de la forme de l'encoche, nous avons :

$$h_{zr} = h_1 + 2h_2 + h_3$$

Ce qui donne :

$$t'_2 = \frac{\pi D}{Z_r} - \frac{2\pi}{Z_r} (h_{er1} + 2h_{er2} + h_{er3})$$

$$t'_2 = t_2 - \frac{2\pi}{Z_r} (h_{er1} + 2h_{er2} + h_{er3})$$

Si on appelle $b_{zr.min}$ la largeur de la dent à la base, nous aurons :

$$b_{er1} = t'_2 - b_{zr.min}$$

$$b_{er1} = t_2 - \frac{2\pi}{Z_r} (h_{er1} + 2h_{er2} + h_{er3}) - b_{zr.min}$$

Or

$$b_{er1} = t_2 - b_{zr.min} - \frac{2\pi}{Z_r} (2h_{er2} + h_{er3}) - \frac{2\pi}{Z_r} h_{er1}$$

Donc la section de l'encoche sera :

$$S_b = b_{er1} \cdot h_{er1} = \left[t_2 - b_{zr.min} - \frac{2\pi}{Z_r} (2h_{er2} + h_{er3}) - \frac{2\pi}{Z_r} h_{er1} \right] h_{er1}$$

Ce qui donne :

$$\frac{2\pi}{Z_r} h_{er1}^2 - \left[t_2 - b_{zr.min} - \frac{2\pi}{Z_r} (2h_{er2} + h_{er3}) \right] h_{er1} + S_b = 0$$

d'où, en résolvant cette équation:

$$h_{er1} = \frac{t_2 - b_{zr.min} - \frac{2\pi}{Z_r} (2.h_{er2} + h_{er3}) - \sqrt{\left(\dots \right)^2 - \frac{4.S_b.2\pi}{Z_r}}}{\frac{4\pi}{Z_r}}$$

Le terme entre parenthèses dans la racine représente:

$$t_2 - b_{zr.min} - \frac{2\pi}{Z_r} (h_{er3} + 2.h_{er2})$$

La largeur minimum de la dent étant déterminée par:

$$b_{zr.min} = \frac{t_2 \cdot L_g \cdot B_\delta}{B_{zr.max} \cdot L_2 \cdot k_c}$$

$B_{zr.max}$ est l'induction à la base de la dent. Elle varie entre 1,6 et 2,2 T.

Dans l'équation donnant h_{er1} , la valeur minimum que peut prendre le terme sous la racine est 0.

On pourra donc en déduire la valeur minimum de $b_{zr.min}$:

$$\left[t_2 - b_{zr.min} - \frac{2\pi}{Z_r} (h_{er3} + 2.h_{er2}) \right]^2 - \frac{4.S_b.2\pi}{Z_r} = 0$$

ce qui donne:

$$t_2 - b_{zr.min} - \frac{2\pi}{Z_r} (2.h_{er2} + h_{er3}) = \sqrt{\frac{4.S_b.2\pi}{Z_r}}$$

d'où

$$b_{zr.min} = t_2 - \frac{2\pi}{Z_r} (2.h_{er2} + h_{er3}) - \sqrt{\frac{4.S_b.2\pi}{Z_r}}$$

Il est ainsi possible de calculer la limite minimum de l'induction à la base de la dent, connaissant $b_{zr.min}$.

De ce fait la plus petite valeur que peut prendre h_{er1} est:

$$h_{er1} = \frac{t_2 - b_{zr.min} - \frac{2\pi}{Z_r} (2.h_{er2} + h_{er3})}{\frac{2\pi}{Z_r}}$$

La limite maximum de h_{er1} dépendra de la valeur maximum de l'induction à la base de la dent.

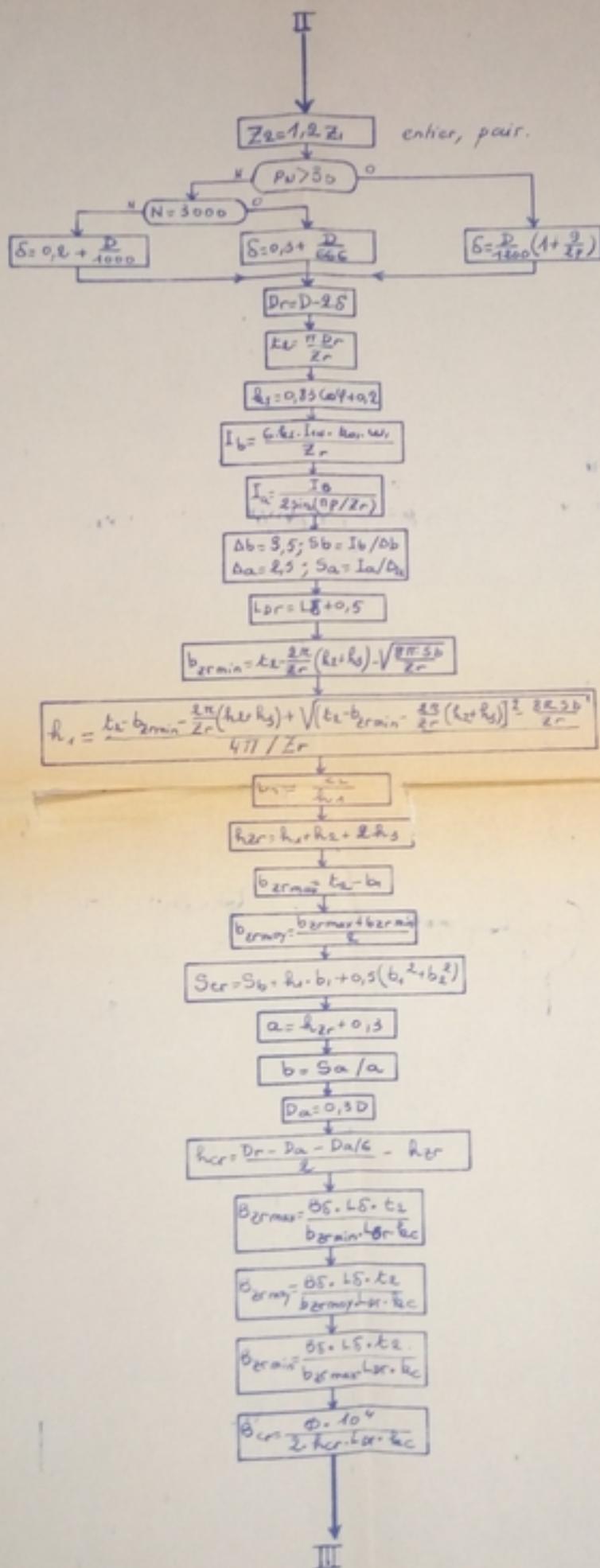
On introduira dans notre programme de calcul les équations suivantes, pour les dimensions de l'encôche:

$$b_{zr.min} = t_2 - \frac{2}{Z_r}(2h_{er2} + h_{er3}) - \frac{4.S_b.2}{Z_r}$$
$$h_{er1} = \frac{t_2 - b_{zr.min} - \frac{2}{Z_r}(2h_{er2} + h_{er3})}{\frac{2}{Z_r}}$$

L'induction à la base de la dent résulte de :

$$B_{zr.max} = \frac{t_2 . L . B}{b_{zr.min} L_2 . k_c}$$

Enroulement, encoches et dents du rotor.



II.4 / Courants magnetisants.

Comme le montre la fig. 4-3, le tracé en coordonnées logarithmiques de la caractéristique $B = f(H)$, donnée sur le tableau 4.1 au chapitre précédent, nous permet de départager la courbe en différents droits.

Les équations de ces droits sont :

Courbe 1 : pour $B < 1,5$ T

$$H = \exp \left(2,3 \frac{B - 0,5}{0,717} \right)$$

pour $B = 1,5$ T $H = 25$ A

Courbe 2 : pour $1,5 < B < 1,75$

$$H = \exp \left(2,3 \frac{B - 0,925}{0,412} \right)$$

pour $B = 1,75$ T $H = 101$

Courbe 3 : pour $1,75 < B < 2$ T

$$H = \exp \left(2,3 \frac{B - 0,72}{0,514} \right)$$

pour : $B = 2$ T $H = 310$ A.

Courbe 4 : pour $2 < B < 2,15$ T

$$H = \exp \left(2,3 \frac{B - 1,2876}{0,286} \right)$$

pour : $B = 2,15$ T $H = 1040$ A.

Pour des inductions supereuiores à 2,15 T, la caracteris-
tique devient lineaire et son équation est, dans ces conditions :

$$H = \left(\frac{B - 2,02}{1,256} \right) 10^4$$

A partir de ces relations, et connaissant les inductions on pourra déterminer les intensités du champ dans les dents et culasse du stator et du rotor, et donc des forces magnetomotrices et du coefficient de saturation.

En se referant à la fig. 4-2 du précédent chapitre, donnant le coefficient de pôle théorique en fonction du coeffi-
cient de saturation, on remarque que cette fonction peut être simulée en deux demie droites ayant pour équation :

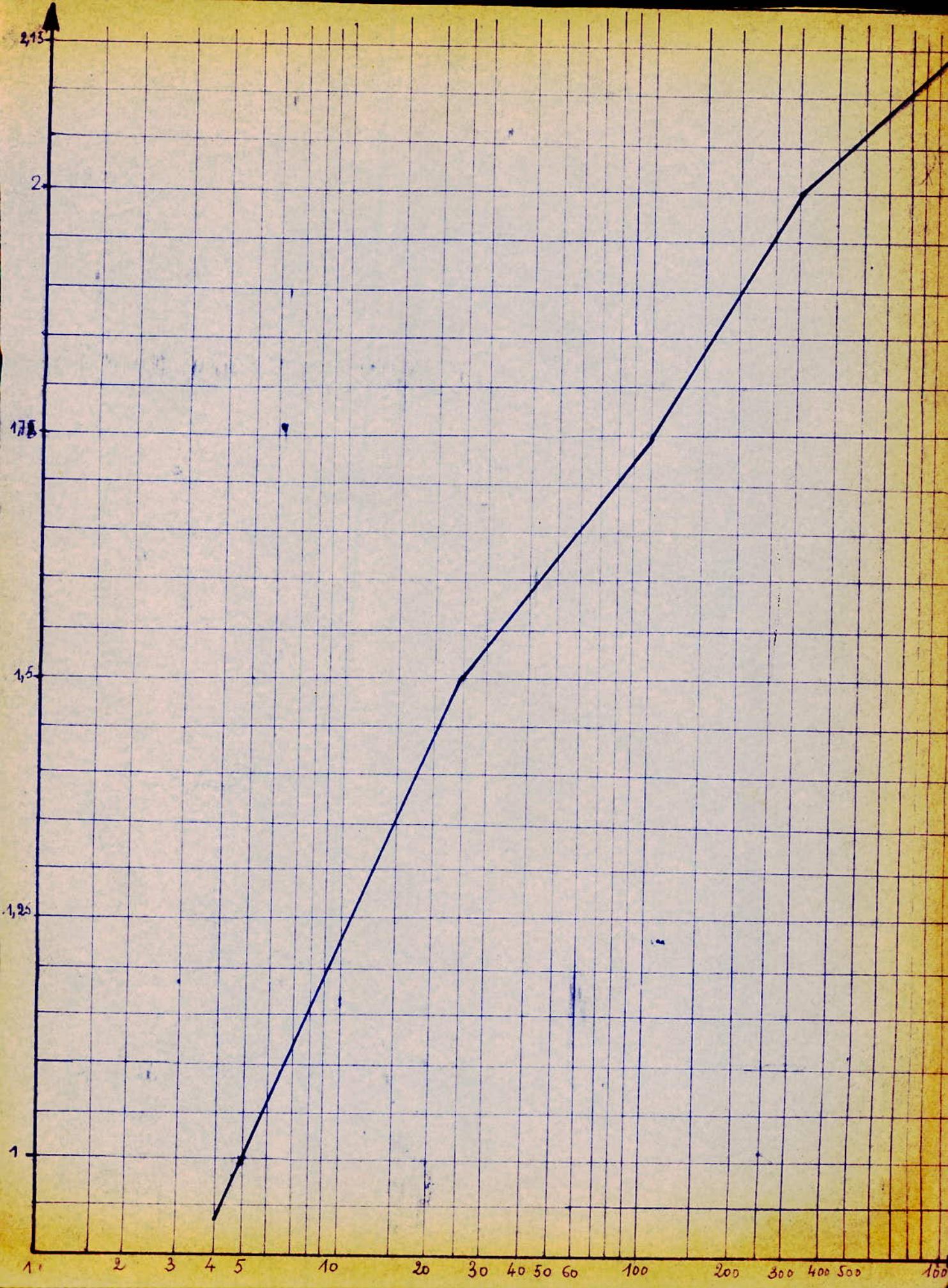
$$k_z > 1,315 \quad a \delta = 0,116.k_z + 0,5613$$

$$k_z < 1,315 \quad a \delta = 0,2.k_z + 0,45$$

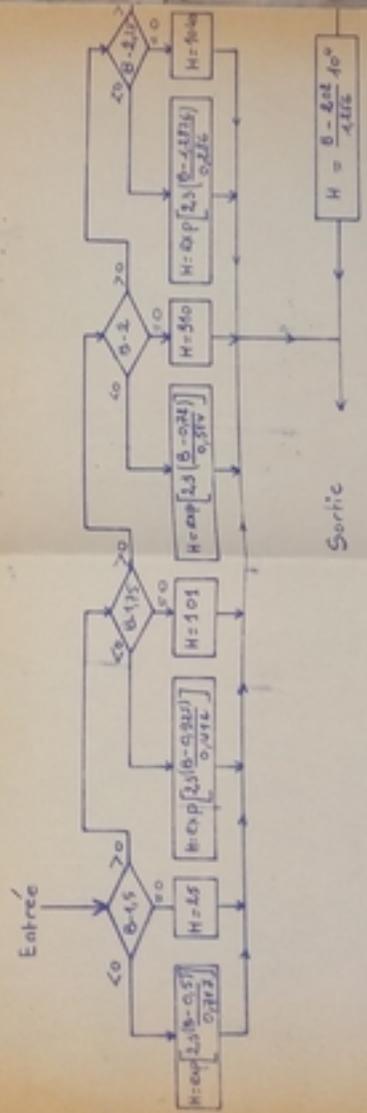
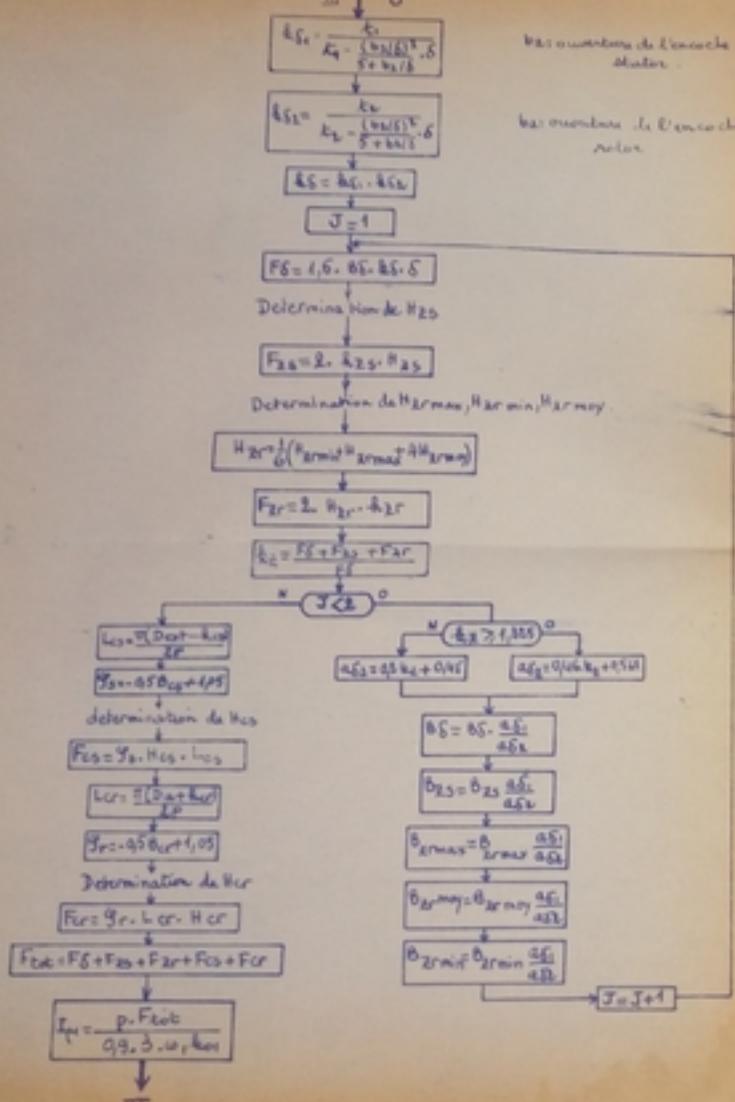
pour $k_z = 1,315 \quad a \delta = 0,715$

Pour la détermination du coefficient qui tient compte de la variation de l'induction magnetique le long des lignes d'induction et tenant compte du fait qu, l'induction magnetique dans la culasse du stator et du rotor varie généralement entre 1 et 1,5 T, on remarque, sur la caractéristique représentée fig. 4-3 que, dans ces limites, la fonction $\mathcal{F} = f (B_{c(s,r)})$ est lineaire et a pour équation :

$$\mathcal{F} = 0,5.B_{c(s,r)} + 1,05$$



Courant H ginch Sant



Determination de H25, Hcrmin, Hcrmax, Hcr, Hcr0

- B prend les valeurs :
- B25
 - Bcrmax
 - Bcrmin
 - B25
 - Bcr

II. 5 // Paramètres électriques du moteur :

*) Pour des moteurs ayant un ou deux ou trois paires de pôles on prendra pour K_{p1} et B , dans la relation de calcul de la longueur frontale d'une demi spire, les valeurs suivantes ;

$$K_{p1} = 1,5 \quad B = 2$$

d'où $L_{f1} = 1,5 \tau_{y1} \cdot 2$

avec $\tau_{y1} = \pi \frac{(D + 2zs)}{Z_1}$

nous rappelons que y représente le raccourcissement du pas. Pour des moteurs à nombre de paire de pôles supérieur ou égal à 4, $K_{p1} = 1,9$ et $B = 1$.

*) Les enroulements du stator sont exécutés en cuivre. Pour le calcul de la résistance statorique, ρ_{75} qui représente la résistivité du cuivre à 75°C, aura la valeur :

$$\rho_{75} = \frac{1}{40} \text{ ohms. mm}^2/\text{m}$$

Pour les anneaux et les barres, le matériel utilisé est l'aluminium. Dans ces conditions, on prendra pour la résistivité de l'aluminium la valeur :

$$\rho_{75a} = \frac{1}{23} \cdot 10^{-6} \text{ ohm m}^2/\text{m}$$

Comme dans le programme, L_2 sera en cm, et la section des barres et celle des des anneaux en mm^2 , nous aurons :

$$\rho_{75a} = \frac{1}{23} \cdot 10^{-4} \text{ ohm mm}^2/\text{cm}$$

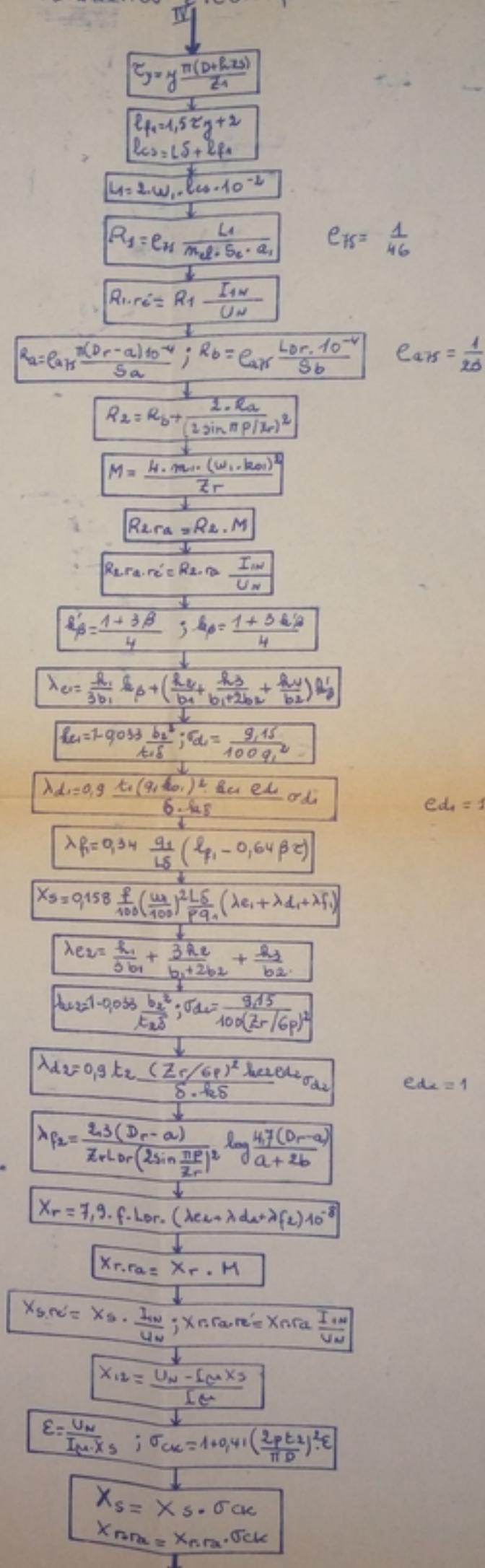
*) Pour le calcul des perméances différentielles du stator et du rotor ρ_{d1} et ρ_{d2} sont généralement très peu différents de 1.

$$\rho_{d1} = \rho_{d2} \approx 1$$

Les coefficients σ_{d1} et σ_{d2} seront calculés par la relation :

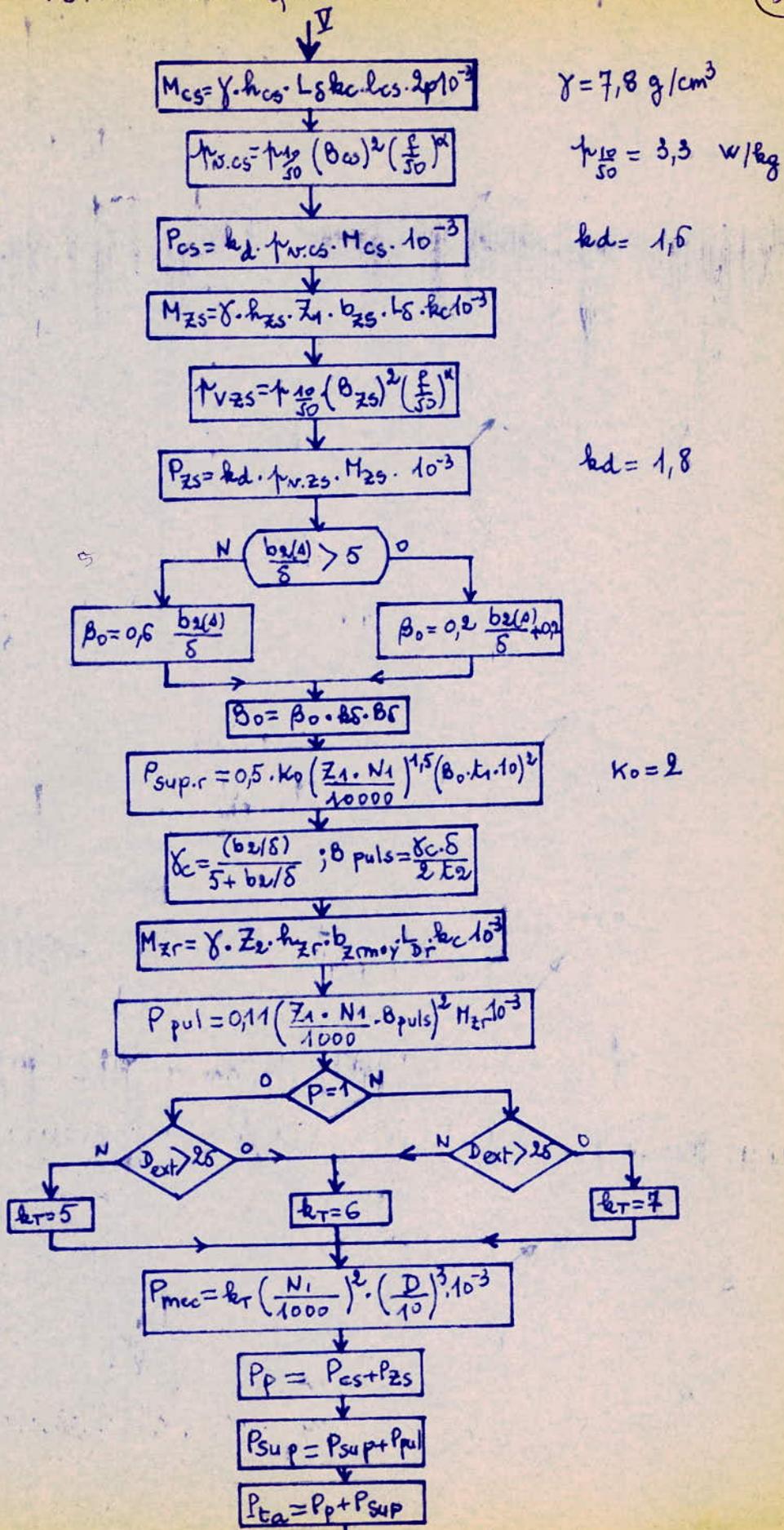
$$\sigma_{d1} = \frac{9,15}{100q_1^2} \quad \text{et} \quad \sigma_{d2} = \frac{9,15}{100 \left(\frac{Z_1}{6p} \right)^2}$$

Paramètres électriques.



Pertes mecaniques et dans le fer

(52)



VII . / Déterminations des caractéristiques de service.

Dans ce paragraphe, on dressera un programme et un organigramme de calcul permettant de déterminer les caractéristiques de service du moteur à savoir le rendement, le facteur de puissance, le courant et la puissance primaires en fonction de la puissance du rotor et ce pour différentes valeurs du glissement qu'on fera varier de 0 jusqu'à $1,3xg_n$.

On calculera le glissement nominal par la relation:

$$g_n = \frac{I'_{2N} \cdot R_{2ra}}{U_N - I'_{2N} X_I}$$

I'_{2N} représente le courant nominal du rotor rapporté au stator,

On a pris le courant rotorique nominal égal au courant nominal statorique. En effet le courant nominal statorique est la composante du courant rotorique et du courant magnétisant.

Pour la détermination du courant rotorique, nous n'avons pas tenu compte de cette composante du courant magnétisant.

L'erreur commise sur le glissement nominal ne sera pas tellement importante (0,1 à 0,3 %).

On calculera le coefficient de correction C_1 qui permet de passer au diagramme du cercle corrigé par la relation:

$$C_1 = 1 + \frac{X_S}{X_{12}}$$

Le courant rotorique nominal est donc, pour le glissement nominal:

$$I_{2.ra} = C_1 \cdot I''_2$$

avec : $I''_2 = \frac{\bar{U}_{1N}}{Z}$; $Z = R^2 + X^2$; $R = C_1 R + C_1^2 \cdot R_{2.ra} / g_n$

$$X = C_1 X_1 + C_1^2 \cdot X_{2.ra}$$

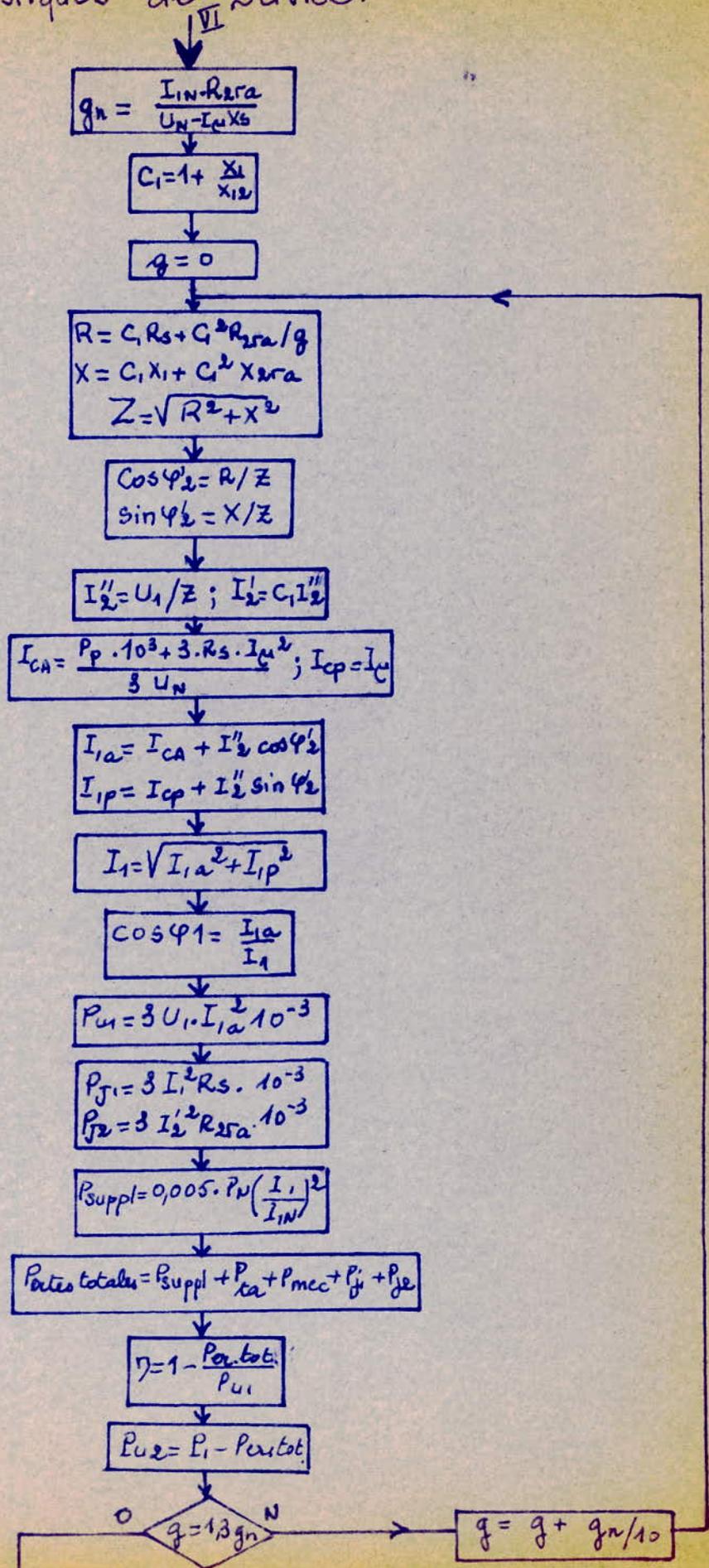
En prenant pour composantes active et réactive du courant magnétisant :

$$I_{ca} = \frac{P_p \cdot 10^{-3} + 3 \cdot I_p^2 R_1}{3 \cdot U_N} ; \quad I_{cp} = I_p'$$

On effectuera les calculs suivants ,pour les différentes valeurs du glissement, afin de pouvoir tracer les caractéristiques de service:

g	$g_n/10$	$1,3 \cdot g_n$
$R = C_I \cdot R_s + C_1^2 \frac{R_{2.ra}}{g}$			
$X = C_I X_I + C_1^2 \cdot X_{2ra}$			
$Z = R^2 + X^2$			
$\cos \phi_1 = R/Z$			
$\sin \phi_1 = X/Z$			
$I''_2 = U_1/Z$			
$I'_2 = C_1 I''_2$			
$I_{1a} = I_{ca} + I''_2 \cos \phi_2$			
$I_{1r} = I_{cp} + I''_2 \sin \phi_2$			
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2}$			
$\cos \phi_1 = I_{1a} / I_1$			
$P_1 = 3U_1 I_{1a} 10^{-3}$			
$P_{j1} = 3I_1^2 R_s 10^{-3}$			
$P_{j2} = 3I_2'^2 R_{2.ra} 10^{-3}$			
$P_{suppl} = 0,005 P_N \left(\frac{I_1}{I_{1N}} \right)^2$			
$\sum \text{pertes} = P_{j1} + P_{fer} + P_{nec.} + P_{j2} + P_{suppl}$			
$\eta = 1 - \frac{\sum P_{pertes}}{P_1}$			
$P_2 = P_1 - \sum P_i$			

Caracteristiques de service.



VIII. / Caractéristiques de démarrage

Les caractéristiques de démarrage sont les plus importantes du moteur asynchrone. On tracera, en faisant varier le glissement de 0 à 1, les caractéristiques du courant $\frac{I_1}{I_{1N}}$ du couple

$$\frac{C}{CN'_{om}} \text{ en fonction du glissement.}$$

Le tracé de ses caractéristiques nous permettra de connaître le courant et le couple de démarrage qui sont obtenus pour un glissement égal à 1.

Pour le tracé les caractéristiques, on devra tenir compte de l'effet pelliculaire .

On déterminera certains coefficients qui caractérisent cet effet pelliculaire par les relations :

$$\xi = 0,067 a \sqrt{g} \quad ('a' \text{ en mm })$$

$$\varphi = \xi - 1$$

$$\psi = \frac{1,5}{\xi}$$

VIII. 1 / Influence sur la résistance.

On définit le facteur d'augmentation de la résistance, dû à l'effet pelliculaire par la relation :

$$K_r = \frac{L_{2e}}{L_2} \varphi + 1$$

L_2 étant la longueur de la barre et L_{2e} la longueur de la partie de la barre comprise dans l'encoche. Si on considère que les barres sont exécutées en aluminium coulé, et dans le cas où on n'a pas de canaux radiaux de ventilation : $L_{2e} = L_2$.

La résistance des barres

$$R_{b\zeta} = R_b \cdot K_r$$

d'où la résistance rotorique

$$R_{r\zeta} = R_{b\zeta} + \frac{2R_a}{2 \sin \frac{\pi P}{Z_2}}$$

VIII. 2 / Influence sur la perméance de dispersion rotorique.

La perméance de dispersion d'encoche, rotorique en tenant compte de l'effet pelliculaire. Sera calculée à partir de la relation :

$$\lambda_{e2\zeta} = \left(\frac{h_1}{3b_1} + \frac{3h_2}{b_1+2b_2} \right) \gamma + \frac{h_3}{b_2}$$

La réactance rotorique sera ; en tenant compte de l'inclinaison des encoches

$$X_{2\zeta} = X_2 \frac{(\lambda_{e2\zeta} + \lambda_{d2} + \lambda_{f2})}{(\lambda_{e2} + \lambda_{d2} + \lambda_{f2})} \cdot \sigma_{ck}$$

Les paramètres ramenés au stator seront :

$$R_{r\zeta} \cdot r_a = R_{r\zeta} \cdot M$$

$$X_{2\zeta} \cdot r_a = X_{2\zeta} \cdot M$$

Les résistance et réactance de court-circuit de la machine sont :

$$R_{cc\zeta} = R_1 + R_{r\zeta} \cdot r_a$$

$$X_{cc\zeta} = X_1 + X_{2\zeta} \cdot r_a$$

L'impédance de court-circuit sera donc :

$$Z_{cc\varphi} = \sqrt{R_{cc\varphi}^2 + X_{cc\varphi}^2}$$

d'où le courant de court-circuit:

$$I_{cc} = \frac{U_N}{Z_{cc\varphi}}$$

VIII . 3 / Influence de la saturation.

Le courant de court-circuit effectif est déterminé comme suit :

$$I_{cc.s} = I_{cc} \cdot k_s$$

k_s est un coefficient qui tient compte de la saturation du champ de fuite .

D'après la pratique $k_s = 1,3$

On définit ainsi la force magnéto-motrice se rapportant à une encoche du stator :

$$F_{ms} = 0,7 \frac{I_{cc.s} \cdot U_{nl}}{a_1} \left(k_\beta + k_{y1} \cdot k_{01} \frac{Z_1}{Z_2} \right)$$

L'induction fictive dans l'entrefer résulte de :

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{ms}}{1,6 \cdot C_s \cdot \delta}$$

avec

$$C_s = 0,64 + \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}}$$

Nous pourrions ainsi calculer le coefficient χ_s qui tient compte de la saturation du champ de fuite par la relation:

$$\chi_s = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,13 \cdot B_{\phi\delta}^2}}$$

Ce coefficient caractérise le rapport du flux de fuite avec saturation au flux de fuite sans saturation.

Les variations des perméances dues à la saturation seront calculées à partir des relations:

-- pour le stator :

$$\text{en posant } C_1 = (t_1 - b_2) (1 - \chi_\delta)$$

la variation de la perméance d'encoche est:

$$\Delta \lambda_{1s} = \frac{h_2 - 0,58 \cdot h_3}{b_2} \cdot \frac{C_1}{C_1 + 1,5 \cdot b_2}$$

La perméance d'encoche sera donc:

$$\lambda_{els} = \lambda_{el} - \lambda_{1s}$$

La perméance d'encoche différentielle, tenant compte de la saturation est:

$$\lambda_{d1s} = d1 \cdot \chi_\delta$$

La perméance totale de fuite du stator est donc :

$$\lambda_{1s} = \lambda_{els} + \lambda_{d1s} + \lambda_{f1}$$

On calculera la réactance de fuite du stator par la relation

$$X_{1s} = X_s \cdot \frac{\lambda_{1s}}{\lambda_1}$$

-- pour le rotor :

On définit les variations de la même manière que pour le stator, mais en plus, il y a l'effet pelliculaire qui rentre en jeu.

$$\text{avec } C_2 = (t_2 - b_2) (1 - \chi_\delta)$$

$$\lambda_{e2s} = \frac{h_2}{b_2} \left(\frac{C_2}{C_2 + b_2} \right)$$

d'où la perméance d'encoche rotorique :

$$\lambda_{e2s} = \lambda_{e2} - \lambda_{e2s}$$

la permeance différentielle est :

$$\lambda_{d2s} = \lambda_{d2} \cdot \chi_s$$

La permeance de fuite totale du rotor est donc :

$$\lambda_{2fs} = \lambda_{e2fs} + \lambda_{d2s} + \lambda_{f2}$$

d'où la reactance de fuite rotorique :

$$X_{rfsra} = X_{r.ra} \frac{\lambda_{2s}}{\lambda_2}$$

La reactance de court-circuit de la machine sera :

$$X_{ccs} = X_{1s} + X_{rfs.ra}$$

on en déduit l'impédance de court-circuit:

$$Z_{ccs} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{ccs}^2}$$

Toujours en tenant compte de la saturation, la reactance utile du stator sera:

$$X_{12s} = X_{12} \frac{F_{tot}}{F_s}$$

avec $C = -g(X_{1s} + X_{rfs.ra})$ et $D_1 = g \cdot R_T + R_{r.ra}$

On calculera le courant statorique par la relation:

$$I_1 = \frac{U_{1N} \cdot g}{\sqrt{C^2 + D_1^2}}$$

La caractéristique de démarrage du courant est définie par le rapport du courant I_1 au courant nominal.

$$C_{d1} = \frac{I_1}{I_{1N}}$$

La caractéristique du couple de démarrage en fonction du couple nominal est donné par la relation:

$$C_{d2} = \frac{C_{den}}{C_N} = \left(\frac{I_{2.ra}}{I_{2N}} \right)^2 \frac{R_{r.ra}}{R_{r.ra}} \frac{g_N}{g}$$

$$\text{avec } I_{2.ra} = \frac{1}{1 + \frac{X_{2.ra}}{X_{12s}}}$$

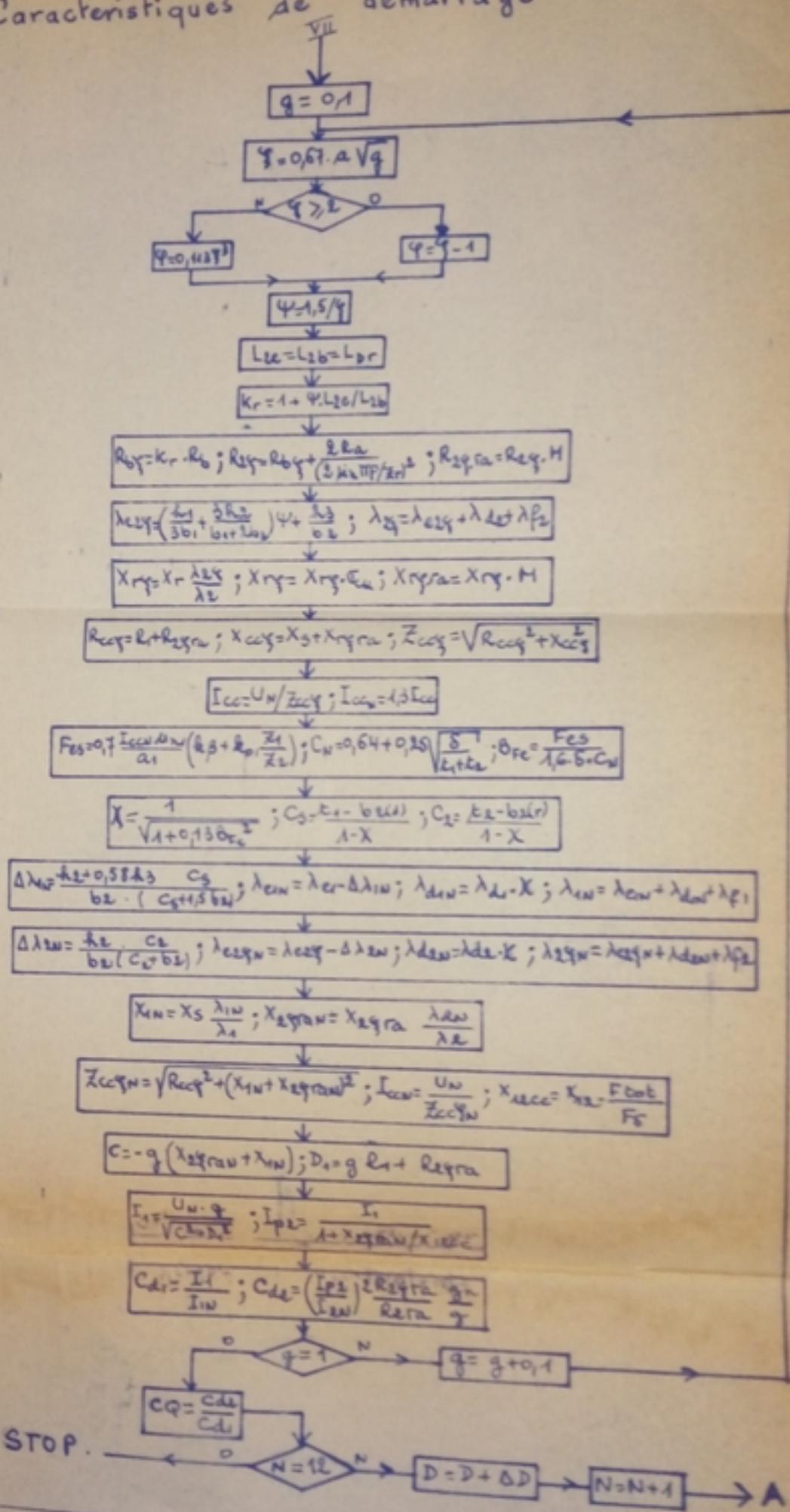
On définit ainsi le rapport $C_q = \frac{C_{d2}}{C_{d1}}$ appelé

degré de qualité du moteur .

Notre moteur sera d'autant meilleur que son couple au démarrage sera plus grand et son courant de démarrage plus petit .

Notre choix se portera sur la variante donnant le plus grand degré de qualité.

PA0027 Caractéristiques de démarrage



C H A P I T R E III



A P P L I C A T I O N

Dans cette partie, nous allons mettre en application la méthode de calcul proposée précédemment.

Les données initiales du moteur sont:

- Puissance nominale $P_N = 13 \text{ kW}$
- Tension nominale $U_{1N} = 220/380 \text{ V}$
- Fréquence $F = 50 \text{ Hz}$
- Vitesse..... $N = 1500 \text{ tr/mn}$
- Facteur de puissance $\cos\phi_N = 0,88$
- Rendement nominal..... $\eta_N = 0,885$

L'introduction de ces données dans le programme de calcul a donné les résultats suivants, pour les différentes valeurs du diamètre:

D	V		C_{d1}	C_{d2}	C_q	k_z	k
16,19	4197,98	1,26	6,44	1,89	0,294	1,489	2,2
16,69	4128,81	1,13	6,74	1,93	0,2861	1,487	2,2
17,19	4062,79	1,02	6,45	1,79	0,278	1,487	2,21
17,69	3999,69	0,92	6,18	1,67	0,2701	1,486	2,22
18,19	3939,33	0,83	5,89	1,59	0,2692	1,483	2,195
18,69	3881,50	0,76	5,64	1,46	0,2592	1,479	2,183
19,19	3826,02	0,68	.....	.....	.....	.....	.....
19,69	3772,76	0,63	.....	.....	.....	.....	.....
20,19	3721,56	0,58	.....	.....	.....	.....	.....
20,69	3672,31	0,53	.....	.....	.....	.....	.....
21,19	3624,87	0,49	.....	.....	.....	.....	.....
21,69	3579,15	0,45	.....	.....	.....	.....	.....

Notre choix se portera sur la variante donnant le meilleur degré de qualité du moteur, c'est à dire pour un diamètre du stator intérieur de 16,19 cm.

Les résultats lus sur le listing pour cette valeur du diamètre sont les suivants:

1) Dimensions principales:

$p = 2$; $P_s = 16,19$ kVar
 $D = 16,19$ cm ; $L_{\xi} = 16,01$ cm ; $l = 12,7$ cm ; $\lambda = 1,26$
 $A = 306,01$ A/cm ; $B_g = 0,72$ T

2) Enroulements, encoches et dents du stator:

- nombre de dents : $Z_1 = 36$
- pas dentaire : $T_1 = 1,41$ cm
- nombre de conducteurs efficaces : $U_{nl} = 18$
- courant nominal statorique $I_{1N} = 25,3$ A
- section d'un conducteur : $S_c = 1,65$
- diamètre du conducteur :
- sans isolant : $d_c = 1,45$; - avec isolant : $d_i = 1,56$
- nombre total de conducteurs dans une encoche :
 $n_c = 54$
- section d'une encoche : $S_e = 1,80$ mm²
- dimension de l'encoche :
 $h_{es1} = 2,09$ cm ; $h_{es2} = 0,1$ cm ; $h_{es3} = 0,1$ cm ; $h_{es4} = 0,06$ cm
 $b_{es1} = 0,67$ cm ; $b_{es2} = 0,30$ cm ; $b_{es3} = 1,11$ cm .
- dimension de la dent :
 $h_{zs} = 2,55$ cm ; $b_{zs} = 0,74$ cm .
- flux de la machine :
 $\phi = 12,01 \cdot 10^{-3}$ Wb
- induction dans l'entrefer : $B_g = 0,83$ T
- induction dans la dent : $B_{zs} = 1,65$ T
- hauteur et induction de la culasse:
 $h_{cs} = 2,15$ cm ; $B_{cs} = 1,8$ T

3) Enroulements, encoches et dents du rotor :

- nombre de dents du rotor : $Z_2 = 44$ dents
- épaisseur de l'entrefer : $\delta = 0,41$ mm
- diamètre du rotor : $D_r = 16,11$ cm
- pas dentaire : $T_c = 1,15$ cm

- courant et section des barres :

$$I_b = 251 \text{ A} ; S_b = 0,75 \text{ cm}^2$$

- courant et section des anneaux :

$$I_a = 917 \text{ A} ; S_a = 3,67 \text{ cm}^2$$

- dimension de l'encoche :

$$h_{er1} = 2,29 \text{ cm} ; h_{er3} = 0,1 \text{ cm} ; h_{er2} = 0,1 \text{ cm}$$

$$b_{er1} = 0,29 \text{ cm} ; b_{er2} = 0,1 \text{ cm}$$

- section de l'encoche et de la barre :

$$S_{er} = S_b = 0,69 \text{ cm}^2$$

- dimension de la barre :

$$a = 2,85 \text{ cm} ; b = 1,29 \text{ cm} .$$

- hauteur et induction de la culasse :

$$h_{cr} = 2,67 \text{ cm} ; B_{cr} = 1,43 \text{ T}$$

- dimension de la dent du rotor :

$$h_{zr} = 2,55 \text{ cm}$$

$$b_{zrmax} = 0,86 \text{ cm}$$

$$b_{zrmin} = 0,50 \text{ cm}$$

$$b_{zrmoy} = 0,68 \text{ cm}$$

- induction dans la dent du rotor :

$$B_{zrmax} = 1,947 \text{ T}$$

$$B_{zrmin} = 1,125 \text{ T}$$

$$B_{zrmoy} = 1,426 \text{ T}$$

4) Courants magnétisants :

$$k_{s1} = 1,07 ; k_{s2} = 1,02 ; k_s = 1,09$$

- force magnéto-motrice dans l'entrefer :

$$F_s = 593,78 \text{ A}$$

- coefficient de saturation dans la zone des dents :

$$k_z = 1,489$$

- nouvelles valeurs des inductions :

$$B_s = 0,748 \text{ T}$$

$$B_{zs} = 1,496 \text{ T}$$

$$B_{z\text{moy}} = 1,293 \text{ T}$$

$$B_{z\text{rmin}} = 1,02 \text{ T}$$

$$B_{z\text{rmax}} = 1,765 \text{ T}$$

- force magnéto-motrice dans l'entrefer :

$$F_{\xi} = 538,26 \text{ A}$$

- intensité du champ et force magéto-motrice dans les dents du **rotor** :

$$H_{z\text{rmin}} = 5,30 \frac{\text{A}}{\text{cm}} ; H_{z\text{rmax}} = 107,50 \frac{\text{A}}{\text{cm}} ; H_{z\text{r moy}} = 12,72 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$$

$$H_{zr} = 27,28 \text{ A/cm} ; F_{zr} = 138,98 \text{ A}$$

- intensité du champ et F.M.M dans les dents du stator

$$H_{zs} = 24,39 \text{ A/cm} ; F_{zs} = 124,30 \text{ A}$$

- intensité du champ et F.M.M dans la culasse du stator :

$$H_{cs} = 48,50 \text{ A/cm} ; F_{cs} = 358,58 \text{ A}$$

- intensité du champ et F.M.M dans la culasse du rotor :

$$H_{cr} = 19,84 \text{ A/cm} ; F_{cr} = 39,22 \text{ A}$$

- coefficient de saturation de la machine :

$$k_f = 2,2$$

- courant magnétisant :

$$I_f = 10,9 \text{ A}$$

5) Paramètres électriques :

- résistance statorique :

$$R_1 = 0,333 \text{ ohm}$$

$$\text{en unité réduite } R_1 = 0,0383$$

- résistance rotorique :

$$\# \text{ de la barre } R_b = 10,38 \cdot 10^{-5} \text{ ohm}$$

$$\# \text{ de l'anneau } R_a = 0,112 \cdot 10^{-5} \text{ ohm}$$

$$R_2 = 13,155 \cdot 10^{-5} \text{ ohm}$$

- résistance rotorique ramenée :

$$R_{2.ra} = 0,2385 \text{ ohm}$$

$$\text{en unité réduite } R_{2.ra.ré} = 0,0274$$

- perméance de fuite du stator :

de l'encoche : $P_{es} = 1,712$

différentielle $P_{ds} = 1,476$

frontale $P_{fs} = 0,818$

$$P_1 = 3,997$$

- réactance de fuite statorique :

$$X_s = 0,983 \text{ ohm}$$

en unité réduite $X_{s.ré} = 0,113$

- perméance de fuite rotorique :

de l'encoche $P_{er} = 3,612$

différentielle $P_{dr} = 2,102$

frontale $P_{fr} = 0,550$

$$P_2 = 6,264$$

- réactance de fuite rotorique :

$$X_r = 0,4084 \cdot 10^{-3} \text{ ohm}$$

ramenée $X_{r.ra} = 0,741 \text{ ohm}$

réduite $X_{r.ra.ré} = 0,0851$

- réactance utile par phase :

$$X_{12} = 19,21 \text{ ohm}$$

réduite $X_{12.ré} = 2,208$

- réactance du stator et du rotor ramenée , tenant compte de l'inclinaison des encoches du stator :

$$X_s = 1,050 \text{ ohm}$$

$$X_{r.ra} = 0,792 \text{ ohm}$$

6) Pertes mécaniques et dans le fer :

- dans la culasse du stator:

poids $P_{ocs} = 35,85 \text{ kg}$

pertes volumiques $P_{vcs} = 1,14 \text{ W/kg}$

$$P_{cs} = 0,63 \text{ kW}$$

- dans les dents du stator :

$$\text{poids } P_{\text{ozs}} = 8,09 \text{ kg}$$

$$\text{pertes volumiques } P_{\text{vzs}} = 7,38 \text{ W/kg}$$

$$P_{\text{zs}} = 0,108 \text{ kW}$$

- pertes superficielles dans le fer des dents du rotor :

$$P_{\text{sup.r}} = 0,0220 \text{ kW}$$

- pertes par pulsation dans les dents du rotor

$$P_{\text{puls}} = 0,0288 \text{ kW}$$

- pertes mécaniques

$$P_{\text{mec}} = 0,067 \text{ kW}$$

- pertes principales dans le fer :

$$P_{\text{p}} = P_{\text{cs}} + P_{\text{zs}} = 0,7466 \text{ kW}$$

- pertes supplémentaires dans le fer :

$$P_{\text{sup}} = P_{\text{sup.r}} + P_{\text{puls}} = 0,0507 \text{ kW}$$

- pertes totales dans le fer :

$$P_{\text{ta}} = P_{\text{p}} + P_{\text{sup}} = 0,797 \text{ kW}$$

7) Caractéristiques de service :

- glissement nominal:

$$s_{\text{N}} = 0,0289$$

- courant rotorique nominal

$$I_{2\text{N}} = 24,20 \text{ A}$$

- coefficient de correction:

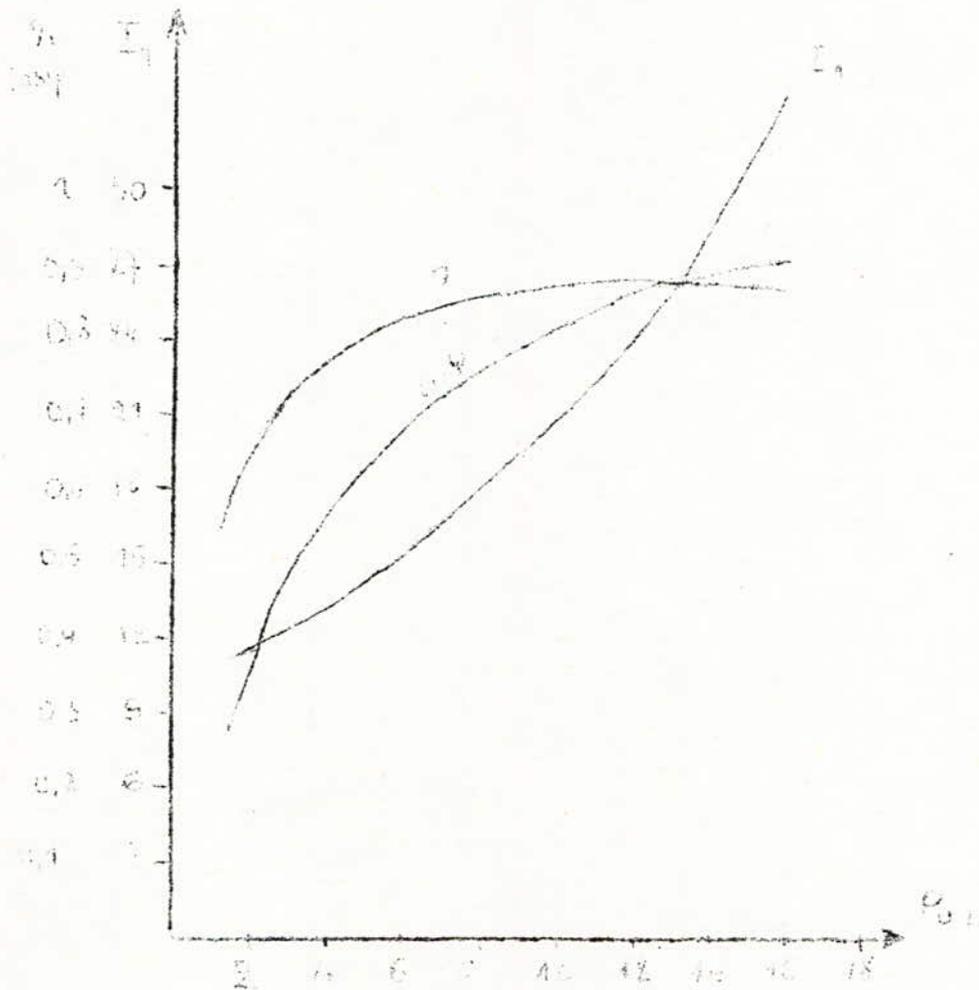
$$C_1 = 1,0547$$

Caractéristiques de service :

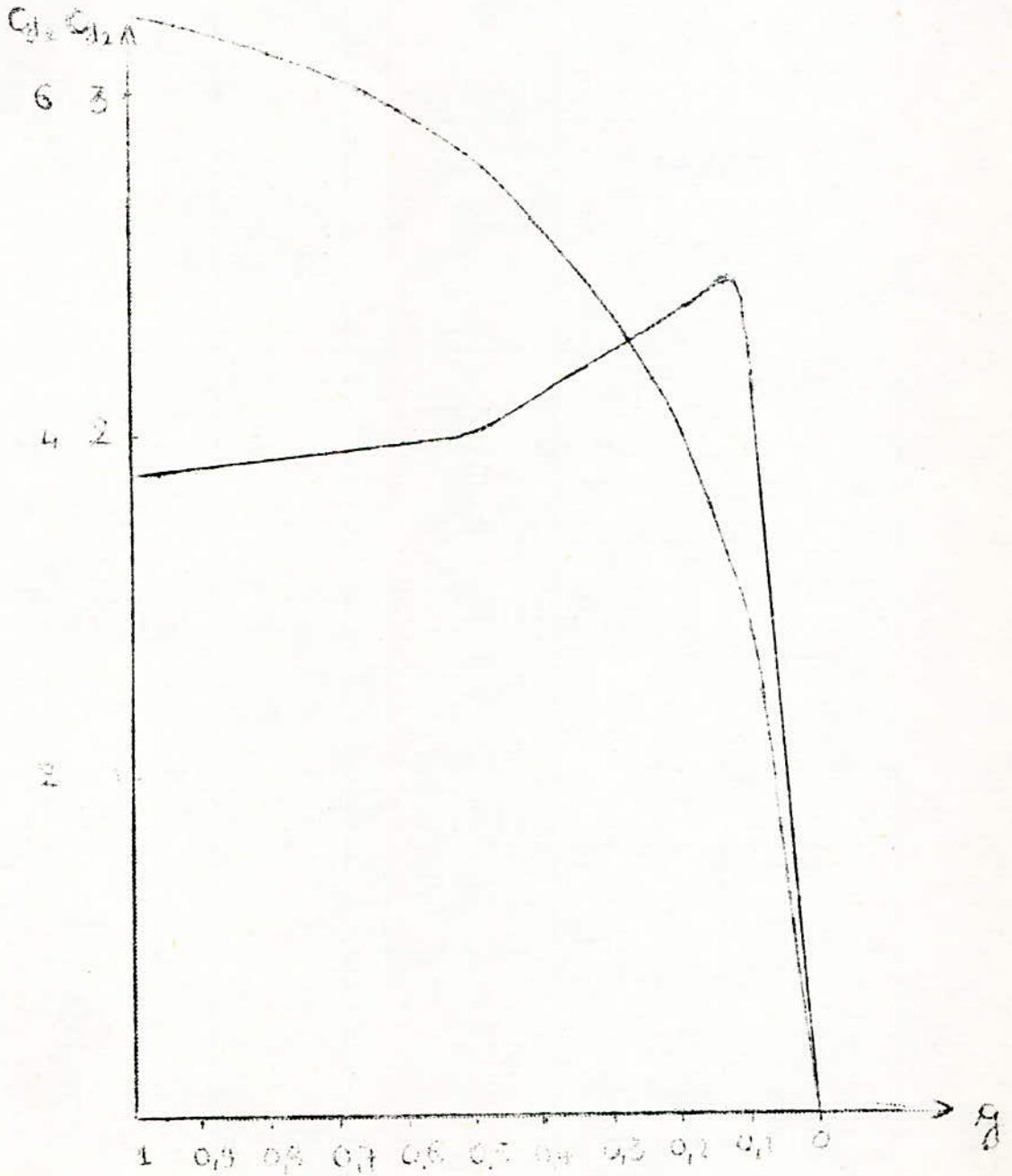
$$I_1 = f(P_{u2})$$

$$\cos \varphi = f(P_{u2})$$

$$\eta = f(P_{u2})$$



Caractéristiques de démarrage du couple (C_{d2}) et du courant (C_{d1}) en fonction du glissement.



CONCLUSION

Tout au long de cette étude , nous avons réussi à mettre en équation les différentes grandeurs du moteur .

L'organigramme et le programme de calcul dressés nous permet de faire le calcul pour différentes variantes .

Le fait de faire varier le diamètre revient en quelque sorte à modifier le facteur de géométrie. Or, comme il a été déjà souligné au début , peut varier entre certaines limites sans pour autant rendre le moteur économiquement défavorable.

Les rapports du courant de démarrage au courant nominal et du couple de démarrage au couple nominal sont les caractéristiques les plus importantes du moteur . C'est la raison pour laquelle le choix de la variante optimale est basée essentiellement sur ces grandeurs .

La méthode de calcul proposée nous donne la possibilité de définir tout moteur ayant une puissance allant de 1 à 100 kW .

Enfin, nous souhaitons vivement que cette étude soit complétée par le calcul de la ventilation et de l'échauffement et également un calcul mécanique.

ANNEXE :

PROGRAMME DE CALCUL

...//

```
READ(105,100)PN,COSPHN,ETAN,UN,NL,F
100 FORMAT(I2,F4.2,F5.3,I3,I4,I2)
READ(105,111)Q1,A1,DELTAC,NEL
111 FORMAT(I1,I1,F3.1,I1)
READ(105,112)HES2,HES3,HES4,BER2,HER2,HER3
112 FORMAT(F3.1,F3.1,F4.2,F4.2,F4.2,F3.1)
C DIMENSIONS PRINCIPALES
P=60.*F/NL
REAL KE
KE=0.98-0.005*P
PS=KE*PN/(ETAN*COSPHN)
WRITE(108,101)P,PS,KE
101 FORMAT(10X,3H P=,I1,4H PS=,F5.2,4H KE=,F5.3//)
IF(P-1.)202,202,203
202 D=7.*PS**0.285
GO TO 206
203 IF(P-2.)204,204,205
204 D=9.*PS**0.272
GO TO 206
205 D=31.6*PS**0.251
206 DELTAD=0.5
D=D-6.*DELTAD
DO 109 N=1,12
WRITE(108,110)N
110 FORMAT(40X,3H N=,I2///)
TOP=3.14*D/(2.*P)
IF(P-1.)207,207,208
207 BB=0.085*ALOG(TOP)+0.42
A=48.5*TOP**0.609
GO TO 211
208 IF(P-2.)209,209,210
209 BB=0.064*ALOG(TOP)+0.56
A=95*TOP**0.453
GO TO 211
210 BB=0.054*ALOG(TOP)+0.6
A=128.5*TOP**0.379
```

```
206 REAL LD
LD=6.1*PS*10**7./(0.715*1.09*0.91*A*BB*N1*D**2)
REAL LAMDA
LAMDA=LD/TOP
V=LD*D**2
WRITE(108,200)V,D,LD,A,BB,LAMDA
200 FORMAT(3H V=,F7.2,3H D=,F5.2,4H LD=,F5.2,3H A=,F6.2
14H BB=,F4.2,7H LAMDA=,F4.2//)
IF(LAMDA<0.7)106,106,102
102 IF(LAMDA<-1,5)107,107,106
C ENROULEMENT, ENCOCHES ET DENTS DU STATOR
107 Z1=6.*P*Q1
T1=3.14*D/Z1
REAL I1N
I1N=PN*10**3/(3.*UN*ETAN*COSPHN)
UN1=A*T1*A1/I1N
IF((UN1-INT(UN1))-0.5)113,114,114
113 UN1=INT(UN1)
114 UN1=INT(UN1)+1
SC=I1N/(A1*NEL*DELTAC)
DC=SQRT(4.*SC/3.14)
IF(DC-1.68)1,2,2
1 IF(DC-1.45)3,4,4
3 IF(DC-1.25)5,6,6
5 IF(DC-1.08)7,8,8
7 IF(DC-1.)9,10,10
9 IF(DC-0.86)11,12,12
11 IF(DC-0.74)13,14,14
13 IF(DC-0.69)15,16,16
15 DC=0.64
DI=0.72
SC=0.322
GO TO 50
16 DC=0.74
DI=0.83
SC=0.43
GO TO 50
```

14 IF(DC-0.80)16,18,18
● DC=0.86
DI=0.95
SC=0.581
GO TO 50

12 IF(DC-0.93)18,19,19
19 DC=1.
DI=1.11
SC=0.785
GO TO 50

10 IF(DC-1.04)19,22,22
22 DC=1.08
DI=1.19
SC=0.916
GO TO 50

8 IF(DC-1.165)22,24,24
24 DC=1.25
DI=1.36
SC=1.227
GO TO 50

6 IF(DC-1.35)24,26,26
26 DC=1.45
DI=1.56
SC=1.651
GO TO 50

4 IF(DC-1.565)26,28,28
28 DC=1.68
DI=1.77
SC=2.22
GO TO 50

2 IF(DC-1.815)28,30,30
30 DC=1.95
DI=2.07
SC=2.99

50 DELTAC=I1N/(A1*NEL*SC)
NC=NEL*UN1
SE=NC*DI**2/73

```
INTEGER Y
Y=0.83*3.*Q1
BETA=Y/(3.*Q1)
KD=SIN(30)/(Q1*SIN(30/Q1))
KP=SIN(BETA*90.)
KO1=KP*KD
W1=P*Q1*UN1/A1
PHI=KE*UN/(4.*1.09*F*W1*KO1)
BBET=PHI*10**4/(0.715*LD*TOP)
BBZS=1.65
BZS=LD*BBET*T1/(LD*BBZS*0.95)
BES1=T1-BZS
BES2=(DI+1.40)/10.
HES1=(-(BES1+(HES2+HES3))/Z1+SQRT((BES1+(HES2+HES3))/Z1**2
1+4.*SE*3.14/Z1))/(2.*3.14/Z1)
HZS=HES1+HES2+HES3+HES4
BES3=3.14*(D+2.*HZS)/Z1-BZS
DEXT=1.58*D
HCS=(DEXT-D)/2.-HZS
BBCS=PHI*10**4/(2.*HCS*LD*0.95)
WRITE(108,116)DC,DI,SC
116 FORMAT(10X,4H DC=,F4.2,4H DI=,F4.2,4H SC=,F4.2/)
WRITE(108,117)Z1,T1,I1N,UN1,W1,NC,SE
117 FORMAT(4H Z1=,I2,4H T1=,F5.2,5H I1N=,F4.1,5H UN1=,I2,4H
1 W1=,I3,4H NC=,I2,4H SE=,F4.2/)
WRITE(108,118)HES1,HES2,HES3,HES4
118 FORMAT(10X,6H HES1=,F5.2,6H HES2=,F3.1,6H HES3=,F3.1,6H
1 HES4=,F4.2//)
WRITE(108,119)BES1,BES2,BES3
119 FORMAT(10X,6H BES1=,F5.2,6H BES2=,F5.2,6H BES3=,F5.2//)
WRITE(108,120)BZS,HZS
120 FORMAT(10X,6H BZS=,F5.2,6H HZS=,F5.2//)
WRITE(108,121)PHI,BBET,BBZS
121 FORMAT(10X,5H PHI=,F7.5,6H BBET=,F4.2,6H BBZS=,F4.2//)
WRITE(108,122)HCS,BBCS
122 FORMAT(10X,5H HCS=,F5.2,6H BBCS=,F4.2////)
```

C ENROULEMENT, ENCOCHES ET DENTS DU ROTOR

```
ZR=1.2*Z1
Z2=ZR/2.
IF((Z2-INT(Z2)-0.5)123,124,124
123 Z2=INT(Z2)
124 Z2=INT(Z2)+1.
ZR=2.*Z2
WRITE(108,125)ZR
125 FORMAT(10X,4H ZR=,I2)
IF(PN-30.)126,126,127
126 IF(N1-1500.)128,128,129
128 DELTA=0.25+D/100.
GO TO 380
129 DELTA=0.3+D/66.6
GO TO 380
380 WRITE(108,130)DELTA
130 FORMAT(10X,7H DELTA=,F4.2)
DR=D-2.*DELTA/10.
T2=3.14*DR/ZR
WRITE(108,131)DR,T2
131 FORMAT(10X,4H DR=,F5.2,4H T2=,F4.2)
REAL K1
K1=0.83*COSPHN+0.20
IB=6.*K1*I1N*W1*KO1/ZR
WRITE(108,132)IB
132 FORMAT(10X,4H IB=,I3)
DELTAB=350.
SB=IB/DELTAB
WRITE(108,133)SB
133 FORMAT(10X,4H SB=,F4.2)
DENOMI=2.*SIN(3.14*P/ZR)
IA=IB/DENOMI
WRITE(108,134)IA
134 FORMAT(10X,4H IA=,I4)
DELTAA=250.
SA=IA/DELTAA
WRITE(108,135)SA
135 FORMAT(10X,4H SA=,F4.2)
```

```
REAL LDR
LDR=LD+0.50
BZRMI=T2-SQRT(8.*3.14*SB/ZR)
BZRMA=BBET*LD*T2/(BZRMI*LDR*0.95)
HER1=1-BZRMI+SQRT((T2-BZRMI)**2-8.*3.14*SB/ZR)/(4.*3.14/ZR)
BER1=SB/HER1
HER=HER1+HER2+HER3*2.
BER1=3.14*(DR-2.*HZR)/ZR-BZRMI
BZRMA=T2-BER1
WRITE(108,137)BZRMA,BZRMI,HZR
137 FORMAT(10X,7H BZRMA=,F4.2,7H BZRMI=,F4.2 5H HZR=,F4.2)
SER=HER1*BER1+0.5*(BER1**2-BER2**2)
SB=SER
WRITE(108,138)SER,SA,SB
138 FORMAT(10X,5H SER=,F4.2,4H SA=,F4.2,4H SB=,F4.2)
WRITE(108,139)BER1,BER2
139 FORMAT(10X,6H BER1=,F4.2,6H BER2=,F4.2)
WRITE(108,140)HER1,HER2,HER3
140 FORMAT(10X,6H HER1=,F5.2,6H HER2=,F5.2,6H HER3=,F5.2)
PA=HZR+0.3
PB=SA/PA
DA=0.3*D
HCR=(DR-DA-DA/6.)/2.-HZR
WRITE(108,141)PA,PB,DA,HCR
141 FORMAT(10X,4H PA=,F4.2,4H PB=,F4.2,4H DA=,F5.2,5H HCR=,F5.2)
BBCR=PHI*10**4/(2.*HCR*LDR*0.95)
BBZRMI=(BBET*T2*LD)/(BZRMA*LDR*0.95)
BBZRMA=(BBET*T2*LD)/(BZRMI*LDR*0.95)
WRITE(108,142)BBCR,BBZRMI,BBZRMA
142 FORMAT(10X,6H BBCR=,F4.2,8H BBZRMI=,F5.3,8H BBZRMA=,F5.3)
BZRMO=(BZRMA+BZRMI)/2.
BBZRMO=(BBET*LD*T2)/(BZRMO*LDR*0.95)
WRITE(108,143)BZRMO,BBZRMO
143 FORMAT(10X,7H BZRMO=,F5.2,8H BBZRMO=,F5.3)
C COURANT MAGNETISANT
REAL KET1,KET2,KET
KET1=T1/(T1-(BES2/DELTA)**2/(5+BES2/DELTA))
KET2=T2/(T2-(BER2/DELTA)**2/(5+BER2/DELTA))
```

```
KET=KET1*KET2
WRITE(108,251)KET2,KET1;KET
251 FORMAT(10X,6H KET2=,F4.2,6H KET1=,F4.2,5H KET=,F4.2)
DO 1000 J=1,2
FET=1.6*BBET*KET*DELTA*10**3
WRITE(108,256)FET
256 FORMAT(20X,5H FET=,F6.2)
IF(BBZRMI-1.5)49,51,52-
49 HHRMI=EXP(2.3*(BBZRMI-0.5)/0.717)
GO TO 360
51 HHRMI=25.
GO TO 360-
52 IF(BBZRMI-1.75)53,54,55
53 HHRMI=EXP(2.3*(BBZRMI-0.925)/0.412)
GO TO 360
54 HHRMI=101.
GO TO 360-
55 IF(BBZRMI-2.)56,57,58
56 HHRMI=EXP(2.3*(BBZRMI-0.72)/0.514)
GO TO 360
56 HHRMI=310.
GO TO 360-
57 IF(BBZRMI-2.15)59,60,61
59 HHRMI=EXP(2.3*(BBZRMI-1.2876)/0.286)
GO TO 360
60 HHRMI=1040.
GO TO 360
61 HHRMI=(BBZRMI-2.02)*10**4/1.256
360 WRITE(108,257)HHRMI
257 FORMAT(10X,8H HHRMI=,F5.2)
IF(BBZRMA-1.5)62,63,64
62 HHRMA=EXP(2.3*(BBZRMA-0.5)/0.717)
GO TO 361
63 HHRMA=25.
GO TO 361-
63 IF(BBZRMA-1.75)65,66,67
65 HHRMA=EXP(2.3*(BBZRMA-0.925)/0.412)
```

```
GO TO 361+
66 HHRMA=101.
GO TO 361.
67 IF(BBZMA-2.)68,69,70
68 HHRMA=EXP(2.3*(BBZMA-0.72)/0.514)
GO TO 361.
69 HHRMA=310.
GO TO 361
70 IF(BBZMA-2.15)71,72,73
71 HHRMA=EXP(2.3*(BBZMA-1.2876)/0.286)
GO TO 361
72 HHRMA=1040.
73 HHRMA=(BBZMA-2.02)*10**4/1.256
361 WRITE(108,258)HHRMA
258 FORMAT(10X,8H HHRMA=,F5.2/)
IF(BBZMO-1.5)74,75,76.
74 HHRMO=EXP(2.3*(BBZMO-0.5)/0.717)
GO TO 362
75 HHRMO=25.
GO TO 362
76 IF(BBZMO-1.75)77,78,79
77 HHRMO=EXP(2.3*(BBZMO-0.925)/0.412)
GO TO 362
78 HHRMO=101.
GO TO 362.
79 IF(BBZMO-2.)80,81,82
80 HHRMO=EXP(2.3*(BBZMO-0.72)/0.514)
GO TO 362
81 HHRMO=310.
GO TO 362
82 IF(BBZMO-2.15)83,84,85
83 HHRMO=EXP(2.3*(BBZMO-1.2876)/0.286)
GO TO 362
84 HHRMO=1040.
GO TO 362
85 HHRMO=(BBZMO-2.02)*10**4/1.256)
362 WRITE(108,259)HHRMO
259 FORMAT(10X,8H HHRMO=,F5.2)
```

```
HHZR=(HHZRMI+HHZRMA+4.*HHZRMO)/6.
FZR=2.*HZR*HHZR
WRITE(108,260)HHZR,FZR
260 FORMAT(10X,6H HHZR=,F6.2,5H FZR=,F6.2)
IF(BBZS-1.5)86,87,88
86 HHZS=EXP(2.3*(BBZS-0.5)/0.717)
GO TO 363
87 HHZS=25.
GO TO 363
88 IF(BBZS-1.75)89,90,91
89 HHZS=EXP(2.3*(BBZS-0.925)/0.412)
GO TO 363
90 HHZS =101.
GOTO 363
91 IF(BBZS-2.)92,93,94
92 HHZS=EXP(2.3*(BBZS-0.72)/0.514)
GO TO 363
93 HHZS=310.
GO TO 363
94 IF(BBZS-2.15)95,96,97
95 HHZS=EXP(2.3*(BBZS-1.2876)/0.286)
GO TO 363
96 HHZS=1040.
GO TO 363
97 HHZS=(BBZS-2.02)/1.256
363 WRITE(108,262)HHZS
262 FORMAT(10X,6H HHZS=,F6.2//)
FZS=2.* HHZS*HZS
WRITE(108,263)FZS
263 FORMAT(20X,5H FZS=,F6.2//)
REAL KSAT
KSAT=(FET+FZS+FZR)/FET
WRITE(108,264)KSAT
264 FORMAT(6H KSAT=,F5.3//)
IF(J-1)297,297,298
```

```
297 IF(KSAT-1.325)98,98,99
98 ADELTA=0.2*KSAT+0.45
GO TO 367
99 ADELTA=0.116*KSAT+0.5613
367 WRITE(108,266)ADELTA
266 FORMAT(8H ADELTA=,F6.4)
BBET=BBET*0.715/ADELTA
BBZS=BBZS*0.715/ADELTA
BBZRMO=BBZRMO*0.715/ADELTA
BBZRMI=BBZRMI*0.715/ADELTA
BBZRMA=BBZRMA*0.715/ADELTA
WRITE(108,300)BBET, BBZS, BBZRMI, BBZRMO, BBZRMA
300 FORMAT(6H BBET=,F5.3,6H BBZS=,F5.3,8H BBZRMI=,F5.3,8H BBZRMO=
1F5.3,8H BBZRMA=,F5.3/)
1000 CONTINUE
298 REAL LCS,LCR
LCS=3.14*(DEXT-HCS)/(2.*P)
LCR=3.14*(DA+HCR)/(2.*P)
TZETAS=-0.5*BBCS+1.05
TZETAR=-0.5*BBZR+1.05
IF(BBCS-1.5)267,268,269
267 HHCS=EXP(2.3*(BBCS-0.5)/0.717)
GO TO 364
268 HHCS=25.
GO TO 364
269 IF(BBCS-1.75)270,271,272
270 HHCS=EXP(2.3*(BBCS-0.925)/0.412)
GO TO 364
271 HHCS=101.
GO TO 364
272 IF(BBCS-2.)273,274,275
273 HHCS=EXP(2.3*(BBCS-0.72)/0.514)
GO TO 364
274 HHCS=310.
GO TO 364
275 IF(BBCS-2.15)276,277,278
```

```
276 HHCS=EXP(2.3*(BBCS-1.2876)/0.286)
    GO TO 364
277 HHCS=1040.
    GO TO 364
278 HHCS=(BBCS-2.02)*10**4/1.256
364 FCS=TZETAS*LCS*HHCS
    WRITE(108,279)HHCS,FCS,LCS,TZETAS
279 FORMAT(10X,6H HHCS=,F5.2,5H FCS=,F6.2,5H LCS=,F4.2,8H TZETAS=,
1F4.2//)
    IF(BBCR-1.5)281,282,283
281 HHCR=EXP(2.3*(BBCR-0.5)/0.717)
    GO TO 365
282 HHCR=25.
    GO TO 365
283 IF(BBCR-1.75)284,285,286
284 HHCR=EXP(2.3*(BBCR-0.925)/0.412)
    GO TO 365
285 HHCR=101.
    GO TO 365
286 IF(BBCR-2.)287,288,289
287 HHCR=EXP(2.3*(BBCR-0.72)/0.514)
    GO TO 365
288 HHCR=310.
    GO TO 365
289 IF(BBCR-2.15)290,291,292
290 HHCR=EXP(2.3*(BBCR-1.2876)/0.286)
    GO TO 365
291 HHCR=1040.
    GO TO 365
292 HHCR=(BBCR-2.02)*10**4/1.256
365 FCR=TZETAR*LCR*HHCR
    WRITE(108,295)HHCR,FCR,LCR,TZETAR
295 FORMAT(10X,6H HHCR=,F5.2,5H FCR=,F6.2,5H LCR=,F4.2,8H TZETAR=,
2F4.2//)
    FTOT=FBT+FBZ+FBZ+FCS+FCR
    REAL IMU
    IMU=P*FTOT/(0.9*3.*W1*KO1)
```

```

WRITE(108,296) FTOT, IMU
296 FORMAT(20X,6H FTOT=,F8.3,5H IMU=,F5.2/)
C PARAMETRES ELECTRIQUES
TOY=Y*3.14*(D+HXS)/Z1
REAL LF1,LCO1,L1
LF1=1.5*TOY+2
LCO1=LD+LF1
L1=2.*W1*LCO1*10**(-2)
R1=L1/(NEL*SC*A1*46.)
R1RE=R1*I1N/UN
WRITE(108,310)R1,R1RE
310 FORMAT(20X,4H R1=,F6.3,6H R1RE=,F8.5//)
RB=LDR*10**(-4)/(SB*23.)
RA=3.14*(ID-PA)*10**(-4)/(ZR*SA*23.)
WRITE(108,313)RB,RA
313 FORMAT(20X,4H RB=,F10.8,4H RA=,F10.8//)
R2=RB+2.*RA/DENOMI**2
WRITE(108,314)R2
314 FORMAT(20X,4H R2=,F10.8//)
M=12.*(W1*KO1)**2/ZR
R2RA=R2*M
R2RARE=R2RA*I1N/UN
WRITE(108,315)R2RA,R2RARE
315 FORMAT(10X,6H R2RA=,F6.4,8H R2RARE=,F8.5//)
REAL KBET1,KBET2
KBET1=(1.+3.*BETA)/4.
KBET2=(1.+3.*KBET1)/4.
C CALCUL DES PERMEANCES DU STATOR
PES=(HES1*KBET2)/(3.*BES1)+(HES2/BES1+3.*HES3/(BES1+BES2)
4+HES4/BES2)*KBET1
REAL KE1
KE1=1.-0.033*BES2**2/(T1*DELTA)
ROD1=9.15/(100*Q1**2)
PDS=0.9*T1*(Q1*KO1)**2*KE1*ROD1/(DELTA/10.*KET)
PFS=0.34*Q1*(LF1-0.64*BETA*TOP)/LD
P1=PES+PDS+PFS
WRITE(108,316)PES,PDS,PFS,P1

```

```
316 FORMAT(5H,PES=,F6.3,5H PDS=,F6.3,5H PFS=,F6.3,4H P1=,F6.3//)
C REACTANCE STATORIQUE
XS=0.158*P1*F/100*(W1/100.)**2*LD/(P*Q1)
XSRE=XS*I1N/UN
WRITE(108,317)XS,XSRE
317 FORMAT(10X,4H XS=,F6.3,6H XSRE=,F8.5//)
C CALCUL DES PERMEANCES DU ROTOR
PER=HER1/(3.*BER1)+3.*HER2/(BER1+2.*BER2)+HER3/BER2
ROD2=9.15/(100.*(ZR/(6.*P))**2)
REAL KE2
KE2=1.-0.033*BER2**2/(T2*DELTA)
PDR=0.9*T2*(ZR/(6.*P))**2*KE2*ROD2/(DELTA/10.*KET)
PFR=2.3*(DR-PA)/(ZR*LDR*DENOMI**2)*ALOG10(4.7*(DR-PA)/(PA+2.*P)
P2=PER+PDR+PFR
WRITE(108,319)PER,PDR,PFR,P2
319 FORMAT(5H,PER=,F6.3,5H PDR=,F6.3,5H PFR=,F6.3,4H P2=,F6.3//)
C REACTANCE ROTORIQUE
XR=7.9*F*LDR*P2*10**(-8)
XRRR=XR*M
XRRARE=XRRR*I1N/UN
WRITE(108,320)XR,XRRR,XRRARE
320 FORMAT(10X,4H XR=,F9.7,6H XRRR=,F6.3,8H XRRARE=,F6.4//)
X12=(UN-IMU*XS)/IMU
X12RA=X12*I1N/UN
WRITE(108,321)X12,X12RA
321 FORMAT(10X,5H X12=,F6.2,7H X12RA=,F6.3//)
EPS=UN/(IMU*XS)
SIGMA=1.+0.41*(2.*P*T2/(3.14*D))**2*EPS
XS=XS*SIGMA
XRRR=XRRR*SIGMA
WRITE(108,322)XS,XRRR
322 FORMAT(10X,4H XS=,F6.3,6H XRRR=,F6.3//)
C PERTES DANS LE FER ET MECANIQUES
POCS=7.8*HCS*LD*0.95*LCS*2.*P*10**(-3)
POZS=7.8*Z1*HZS*BZS*LD*0.95*10**(-3)
PVCS=3.3*BBCS**2*(F/50.)**1.3
PVZS=3.3*BBZS**2*(F/50.)**1.3
```

```
WRITE(108,323)POCS,POZS,PVCS,PVZS
323  FORMAT(6H,POCS=,F5.2,6H POZS=,F5.2,6H PVCS=,F4.2,6H PVZS=,F4.2/)
      PCS=1.6*PVCS*POCS*10**(-3)
      PZS=1.8*PVZS*POZS*10**(-3)
      IF(BES2/(10.*DELTA)-5.)324,324,325
324  BETAO=0.6*BES2/DELTA
      GO TO 326
325  BETAO=0.2*BES2/DELTA
326  BO=BETAO*KET*BBET
      PSUPR=(Z1*N1/10**4)**1.5*((BO*T1*10.))**2
      PSR=2.*P*TOP*(T2-BER2)/T2*LD*PSUPR*10**(-7)
      WRITE(108,327)BETAO,BO,PSUPR,PSR,PCS,PZS
327  FORMAT(7H,BETAO=,F5.2,4H BO=,F4.2,7H PSUPR=,F6.2,//20X,5H PSR=,
5F6.4,5H PCS=,F5.3,5H PZS=,F5.3//)
      POZR=7.8*ZR*HZR*BZRRMO*LDR*0.95*10**(-3)
      BPUL=(BES2/(DELTA/10.))**2*DELTA/10.*BBZRRMO/(2.*T2*(5.+BES2/(DE
4LTA/10.)))
      PPUL=0.11*(Z1*N1*BPUM)**2*(POZR*10**(-9))
      WRITE(108,328)POZR,BPUL,PPUL
328  FORMAT(6H POZR=,F5.3,6H BPUL=,F5.3,6H PPUL=,F6.4//)
      IF(P-1.)329,329,330
329  IF(DEXT-25.)331,331,332
331  KT=5.
      GO TO 334
332  KT=6.
      GO TO 334
330  IF(DEXT-25.)332,332,333
333  KT=7.
334  PMEC=KT*(N1/1000.))**2*(D/10.))**3*10**(-3)
      WRITE(108,335)PMEC
335  FORMAT(20X,6H PMEC=,F5.3//)
      PP=PCS+PZS
      PSUR=PSR+PPUL
      PTA=PP+PSUR
      WRITE(108,336)PP,PSUR,PTA
336  FORMAT(10X,4H PP=,F6.4,6H PSUR=,F6.4,5H PTA=,F5.3///)
```

C CHARACTERISTIQUES DE SERVICE

GN=I1N*R2RA/(UN-IMU*XS)

R12=PP*10**3/(3.*IMU**2)

C1=1.+XS/X12

WRITE(108,337)GN,R12,C1

333 FORMAT(15X,4H GN=,F8.6,5H R12=,F5.3,4H C1=,F7.4)

DO 500 G=0,1.3*GN,GN/10.

R=C1*R1+C1**2*R2RA/G

X=C1*XS+C1**2*X2RA

Z=SQRT(R**2+X**2)

WRITE(108,334)R,X,Z

334 FORMAT(3H,R=,F6.3,3H X=,F6.3,3H Z=,F6.3)

COSP2=R/Z

SINP2=X/Z REAL IS2,IP2,I1A,I1P,ICA,ICP

IS2=UN/Z

IP2=C1*IS2

ICA=(PP*10**3+3.*IMU**2*R1)/(3.*UN)

ICP=IMU

I1A=ICA+IS2*COSP2

I1P=ICP+IS2*SINP2

WRITE(108,335)COSP2,SINP2,I1A,I1P

335 FORMAT(7H,COSP2=,F5.3,7H SINP2=,F5.3,5H I1A=,F5.2,5H I1P=,F5.2)

REAL I1

I1=SQRT(I1A**2+I1P**2)

COSP1=I1A/I1

PU1=3.*UN*I1A*10**(-3)

PJ1=3.*I1**2*R1*10**(-3)

PJ2=3.*IP2**2*R2RA*10**(-3)

PT=PP+PSUR+PMEC

PSUPPL=0.005*PN*(I1/I1N)**2

PERTOT=PJ1+PJ2+PT+PSUPPL

ETA=1-PERTOT/PU1

PU2=PU1-PERTOT

IF(G-GN)336,337,336

336 WRITE(108,338)G

338 FORMAT(40X,3H G=,F8.6//)

WRITE(108,339)I1,COSP1,PU1,PT,ETA,PU2

339 FORMAT(10X,4H I1=,F5.2,7H COSP1=,F4.2,5H PU1=,F6.3,10X,4H PT=

2F5.2,5H ETA=,F5.3,5H PU2=,F6.3//)

```
337 GN=G
    WRITE(108,340)GN
340 FORMAT(40X,4H GN=,F8.6//)
    I2N=IP2
    PU2N=PU2
    WRITE(108,341)I2N,PU2N,I1,COSP1,ETA,PU1
341 FORMAT(10X,5H I2N=,F5.2,6H PU2N=,F6.3,4H I1=,F5.2,/7H COSP1=,
1F4.2,5H ETA=,F5.3,5H PU1=,F6.3//)
500 CONTINUE
C  CARACTERISTIQUES DE DEMARRAGE
    DO 2000 G=0.1,1.1,0.1
    TZETA=0.67*PA*SQRT(G)
    IF(TZETA-2.)342,343,343
342 PHI=0.115*TZETA**3
    GO TO 343
343 PHI=TZETA-1.
344 PSI=1.5/TZETA
    WRITE(108,345)TZETA,PHI,PSI
345 FORMAT(7H,TZETA=,F5.2,5H PHI=,F5.2,5H PSI=,F5.2)
    REAL L2E,L2B,KR
    L2E=LDR
    L2B=LDR
    KR=1.+L2B/L2E*PHI
    RBP=RB*KR
    RRP=RBP+2.*RA/DENOMI
    PERP=(HER1/(3.*BER1)+3.*HER2/(BER1+2.*BER2))*PSI+HER3/BER2
    P2P=PERP+PDR+PFR
    WRITE(108,346)RBP,RRP,PERP,P2P
346 FORMAT(5H,RBP=,F8.6,5H RRP=,F8.6,6H PERP=,F5.4,5H P2P=,F5.3)
    XRP=XR*P2P/P2
    XRP=XRP*SIGMA
    XRPRA=XRP*M
    RRPRA=RRP*M
    WRITE(108,347)XRP,XRPRA,RRPRA
347 FORMAT(5H XRP=,F9.7,7H XRPRA=,F6.3 ,7H RRPRA=,F6.3)
    RCCP=R1+RRPRA
    XCCP=XS+XRPRA
    ZCCP=SQRT(RCCP** 2+XCCP**2)
```

```
WRITE(108,348)RCCP,XCCP,ZCCP
348 FORMAT(6H RCCP=,F5.3,6H XCCP=,F5.3,6H ZCCP=,F5.3)
REAL IK,IKN
IK=UN/ZCCP
IKN=IK*1.3
FESR=0.7*IKN*UNI*(KBET2+KP*KO1*Z1/ZR)/A1
CN=0.64+0.25*SQRT(DELTA/10/(T1+T2))
BFE=FESR*10**(-4)/(0.16*DELTA*CN)
WRITE(108,349)IKN,FESR,BFE
349 FORMAT(5H IKN=,F6.2,6H FESR=,F7.4,5H BFE=,F4.2)
XSI=1./SQRT(1.+0.13*BFE**2)
CS=(T1-BES2)*(1.-XSI)
C2=(T2-BER2)*(1.-XSI)
DP1N=(HES2+0.58*HES3)*CS/(BES2*(CS+1.5*BES2))
PES1=PES-DP1N
PDSN=PDS*XSI
P1N=PES1+PDSN+PFS
X1N=X1*P1N/P1
WRITE(108,350)DP1N,PES1,PDSN,P1N,X1N
350 FORMAT(6H DP1N=,F6.2,6H PES1=,F6.3,6H PDSN=,F6.3,5H P1N=,F6.3,
15H X1N=,F5.3/)
DP2N=HER2*C2/(BER2*(C2+BER2))
PERPN=PERP-DP2N
PERN=PDR*XSI
PRPN=PERPN+PDRN+PFR
XRPRAN=XRRA*PRPN/P2
WRITE(108,351)DP2N,PERPN,PDRN,PRPN,XRPRAN
351 FORMAT(6H DP2N=,F6.3,7H PERPN=,F6.3,6H PDRN=,F6.3,6H PRPN=,F6.3,
7H XRPRAN=,F6.3//)
ZCCPN=SQRT(RCCP**2+(X1N+XRPRAN)**2)
IKN=UN/ZCCPN
X12CC=X12*FTOT/FET
WRITE(108,352)ZCCP,X12CC
352 FORMAT(7H ZCCP=,F5.3,7H X12CC=,F6.3)
C=-G*(XRPRAN+X1N)
D1=G*R1+RRPRA
I1=UN*G/SQRT(C**2+D1**2)
IP2=I1/(1.+XRPRAN/X12CC)
```

```
WRITE(108,353)C,D1,I1,IP2
353 FORMAT(3H C=,F7.3,4H D1=,F6.3,4H I1=,F6.3,5H IP2=,F6.3//)
CD1=I1/I1N
CD2=(IP2/I2N)**2*RRPRA*GN/(R2RA*G)
WRITE(108,354)G
354 FORMAT(40X,3H G=,F3.1//)
WRITE(108,355)CD1,CD2
355 FORMAT(10X,5H CD1=,F5.2,5H CD2=,F5.2//)
2000 CONTINUE
CQ=CD2/CD1
WRITE(108,356)CQ
356 FORMAT(40X,4H CQ=,F6.3///)
106 D=D+DELTAD
109 CONTINUE
STOP
END
```

- B I B L I O G R A P H I E -

- Projection des machines électriques
par P.S. SERGUEEV
Edition de MOSCOU 1969 (En russe)

- Calcul des machines électriques
par D^r Ing. M. LIWSCHITZ
Tome I et 2
Edition S P E S LAUSANNE 1967

- Machines électriques
par M. KOSTENKO et L. PIOTROVSKI
Editions Mir - MOSCOU 1969

- Theorie, fonctionnement et calcul des machines
électriques .
par A. GUILBERT
Editions DUNOP PARIS 1965

- Proiectarea masinilor electrice
par CONSTANTIN V. BAJA
Edition de BUCAREST (en roumain)