PROBLEME DE PHYSIQUE

DIFFERENTS TYPES DE MOTEURS

Le sujet comporte trois parties qui peuvent être traitées indépendamment. Dans chaque partie, le candidat pourra trouver des questions pouvant également être traitées indépendamment.

PREMIERE PARTIE

MODELE D'UN MOTEUR D'AUTOMOBILE A EXPLOSION

Le cycle à « quatre temps » d'un cylindre d'un moteur à explosion d'automobile peut être décrit de façon simplifiée par le cycle classique de Beau de Rochas.

On se propose d'étudier la validité de ce modèle de cycle et d'évaluer, à partir des données techniques d'un constructeur (et en particulier de la consommation) le rendement et la puissance. La puissance sera comparée à celle annoncée dans la notice technique.

On décompose un cycle de fonctionnement en quatre phases correspondant chacune à un aller simple du piston (il s'agit des « quatre temps » du moteur).

Premier temps : étape EA (admission)
En E, le piston est en position haute (le volume disponible est V_E).
La soupape d'admission s'ouvre. Le mélange air-carburant entre dans le cylindre à pression atmosphérique supposée constante ($P_E = 10^5$ Pa) et température constante (température d'admission : $T_E = 80°C$).

En A, le piston est en position basse (le volume disponible est V_A).

Deuxième temps : étape AB (compression)
La soupape d'admission se ferme et le piston comprime le mélange : l'étape AB est une compression adiabatique réversible du mélange qui amène le piston en position haute. On note P_B la pression du mélange en B.

Troisième temps : étapes BC et CD (explosion et détente)
En B, une étincelle provoque la combustion exothermique du mélange : la pression passe quasi-instantanément de P_B à P_C à volume constant.
L'étape CD est une détente adiabatique réversible du mélange (mélange air et gaz brûlés). En D, le piston est en position basse (le volume disponible est V_A).

Quatrième temps : étapes DA et AE (échappement)
En D, la soupape d'échappement s'ouvre sur l'atmosphère.
DA est une transformation quasi-instantanée à volume constant : en A, le gaz est ramené à la pression atmosphérique. Pendant cette transformation DA, on suppose que le gaz n'a pas le temps de s'échapper (la quantité de gaz reste donc constante pendant cette transformation).
Au cours de l'étape AE, le gaz est expulsé dans l'atmosphère à pression et température constantes.

Extrait gratuit de document, le document original comporte 19 pages.

Simplification du cycle :
On ne tiendra pas compte des étapes EA et AE au cours desquelles le système constitué par le gaz contenu dans un cylindre est un système ouvert. On considérera que tout se passe comme si :
- dans chaque cylindre, une quantité de gaz constituant un système fermé décrivait indéfiniment le cycle ABCDA
- le transfert thermique reçu par le fluide était issu d'une source chaude fictive (alors qu'il provient d'une réaction chimique interne).

On supposera, dans tout le problème, que l'automobile roule à 90 km/h en 5ème vitesse. La vitesse du véhicule est évidemment proportionnelle à la vitesse de rotation de l'arbre moteur.

On donne ci-dessous des **données extraites de la notice technique d'une automobile** (moteur classique à quatre cylindres) :

- dimensions du cylindre : alésage x course du piston = 80 mm x 80 mm
- cylindrée (4 cylindres) : 1400 cm^3 (la cylindrée correspond donc à $4(V_A - V_E)$)
- rapport volumétrique : $a = V_A/V_E = 10$

- vitesse pour 1000 tr/mn (en 5ème vitesse) : 30 km/h
- consommation (en litres de carburant pour 100 km effectués à 90 km/h en 5ème vitesse) : 5 L

- Figure 1 : courbe P(Ω) de la puissance mécanique (en kW) en fonction de la vitesse de rotation de l'arbre moteur (en tours/minute)

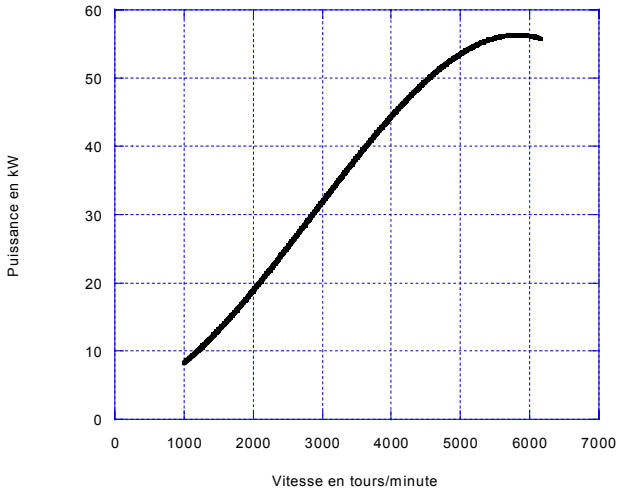

Figure 1

Données et hypothèses relatives au carburant et au mélange :
Nature du carburant :
- formule brute C_8H_{18}
- masse molaire $M_c = 114$ g/mol
- masse volumique $\rho = 720$ kg/m^3
- la combustion du carburant fournit un transfert thermique de 6.10^3 kJ/mole.

Tournez la page S.V.P.

Extrait gratuit de document, le document original comporte 19 pages.

L'air étant fortement en excès par rapport au carburant, on assimilera, pour tout le cycle, le mélange à un gaz parfait diatomique de coefficient isentropique $\gamma = c_p/c_v = 1,4$ et de masse molaire $M = 29$ g/mol.

Rappels : - constante de Boltzmann : $k = 1,38.10^{-23}$ J.K^{-1}
- constante des gaz parfaits : $R = 8,31$ J.mol^{-1}.K^{-1}

On étudie dans ce qui suit le cycle suivi par le mélange gazeux contenu dans un cylindre.

1.1. Tracer l'allure du cycle ABCDA dans le diagramme de Watt (pression en ordonnée, volume en abscisse).

1.2. Transformation AB :

1.2.1. A partir des données techniques du constructeur et sachant que le véhicule roule à 90 km/h, déterminer la durée t_{AB} de la compression AB sachant que l'arbre moteur effectue deux tours lors d'un cycle complet.

1.2.2. Quelle hypothèse relative à la transformation AB le résultat trouvé permet-il de valider ?

1.2.3. Le mélange étant assimilé à un gaz parfait diatomique, on rappelle que l'énergie cinétique moyenne d'une molécule vaut 5/2 kT (où T est la température absolue en kelvins).
Donner dans ces conditions un ordre de grandeur de la vitesse moyenne d'agitation thermique des molécules dans l'état A.

1.2.4. En comparant cette vitesse à la vitesse moyenne du piston au cours de la transformation AB, quelle hypothèse relative à la transformation AB peut-on ainsi admettre ?

1.2.5. Déterminer littéralement puis numériquement la pression P_B et la température T_B (on donnera le résultat en degré Celsius) du mélange gazeux dans l'état B.

1.3. Transformation BC :

1.3.1. En présentant clairement les étapes du calcul, calculer en litres puis en mol la quantité de carburant consommée par cycle et par cylindre (on notera n_c le nombre de moles et on rappelle que le moteur comporte quatre cylindres).

1.3.2. En déduire le transfert thermique Q_{BC} fourni dans un cylindre par la combustion du carburant.

1.3.3. Ce transfert thermique est reçu par le mélange contenu dans un cylindre. Déterminer littéralement puis numériquement :

a) le nombre de moles n de mélange contenu dans un cylindre,

b) la température T_C (résultat en degré Celsius) et la pression P_C du mélange dans l'état C.

Extrait gratuit de document, le document original comporte 19 pages.

1.4. Transformation CD :

Même question (température T_D et pression P_D du mélange) pour l'état D.

1.5. Déterminer littéralement et numériquement le **travail fourni par le gaz au cours d'un cycle**.

1.6. Rendement :

1.6.1. Donner la définition du rendement thermodynamique η du moteur.

1.6.2. **a)** Exprimer η en fonction uniquement des températures T_A, T_B, T_C et T_D.

b) En déduire la valeur numérique du rendement.

1.7. Puissance :

On se place toujours dans les mêmes conditions ($5^{ème}$ vitesse, 90 km/h). On considère maintenant le moteur constitué de ses quatre cylindres.

1.7.1. Déterminer la puissance P_{th} du moteur à partir des résultats de l'étude théorique précédente (**questions 1.2. à 1.5.**) .

1.7.2. Déterminer la puissance P du moteur à partir de la courbe P(Ω) du constructeur.

1.7.3. Comment justifier que l'on trouve $P_{th} < P$?

DEUXIEME PARTIE

MOTEUR A COURANT CONTINU - COMMANDE PAR UN HACHEUR

On s'intéresse maintenant à l'utilisation d'un moteur électrique à courant continu en traction automobile.

On rappelle (figure 2) le schéma équivalent du moteur à courant continu à excitation séparée : u représente la tension aux bornes de l'induit (rotor), i l'intensité du courant le traversant.

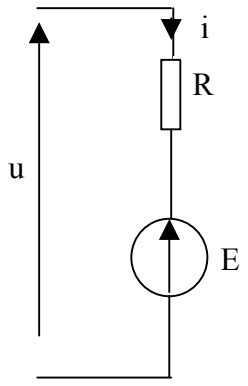

Figure 2

2.1. Etude du moteur à courant continu

Le moteur étant soumis à un couple résistant constant C_r = 60 N.m , un essai réalisé avec u = 120V a donné les résultats suivants :

- f.é.m. E = 100 V
- vitesse de rotation Ω = 3200 tours/minute

Tournez la page S.V.P.

Extrait gratuit de document, le document original comporte 19 pages.

Le moment d'inertie de la partie mobile entraînée par le moteur vaut $J = 1{,}5\ kg.m^2$ et la relation entre la vitesse de rotation du moteur et la vitesse v du véhicule est :

$\Omega = \lambda.v$ avec $\lambda = 35\ tr.mn^{-1}/(km.h^{-1})$.

2.1.1. Rappeler les relations (expressions littérales puis numériques) existant entre les grandeurs électriques E et i et mécaniques Ω et C (C = couple moteur) ; pour les expressions numériques, on précisera les unités employées pour E, i, Ω et C.

2.1.2. Déterminer la valeur de R, résistance de l'induit.

2.1.3. On considère un fonctionnement à couple moteur C constant (C = 60 N.m) et on étudie la phase de « mise en vitesse » d'un véhicule sur une route horizontale. Le moment du couple résistant varie alors suivant une loi du type $C_r = a\Omega + b$ avec $a = 0{,}01\ N.m/(rad.s^{-1})$ et b = 5 N.m .

Calculer le temps Δt_1 mis par le véhicule pour passer de 0 à v = 50 km/h.

2.2. Commande par hacheur

Pour alimenter le moteur à courant continu à partir d'une source (batteries) délivrant une tension continue fixe E_0, on réalise le montage à deux interrupteurs K_1 et K_2 de la figure 3. Une bobine d'inductance L est placée en série avec le moteur. La résistance de la bobine est négligée.

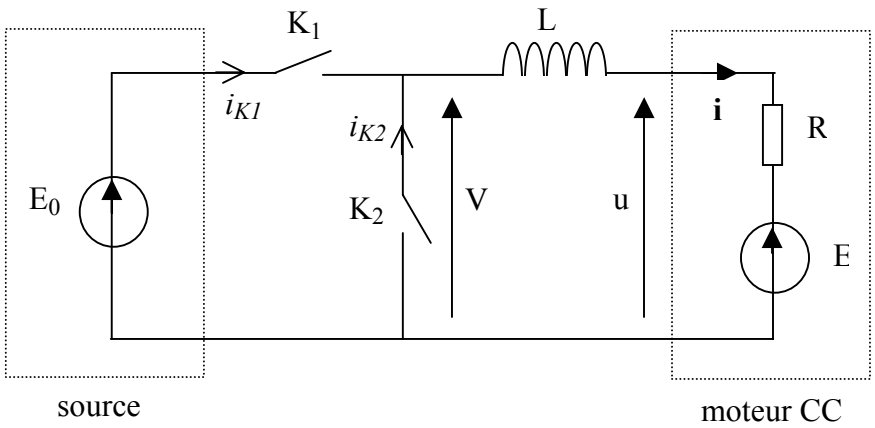

Figure 3

Les interrupteurs K_1 et K_2 sont supposés idéaux.

2.2.1. Qu'est-ce qu'un « interrupteur idéal » ?

2.2.2. Quel est le rôle de la bobine d'inductance L dans ce montage ?

Extrait gratuit de document, le document original comporte 19 pages.

2.2.3. Préciser les états de fonctionnement autorisés pour les interrupteurs K_1 et K_2 compte tenu de la nature de la source et de la charge du hacheur (on justifiera en rappelant les règles d'association des sources auxquelles il faut faire référence) .

2.2.4. On considère dans tout ce qui suit un fonctionnement en **régime périodique établi de période T**. **On considèrera de plus que la résistance R de l'induit est négligeable et que la f.é.m. E est toujours positive**.

L'oscillogramme de la figure 4 fournit un relevé de tensions effectué alors que la source E_0 fournit une puissance P = 3 kW.

La voie 1 représente la tension V.

La voie 2 représente la tension obtenue par une sonde de courant : cette tension est proportionnelle à l'intensité i du courant traversant le moteur (sensibilité de la sonde : 1 volt par ampère).

Base de temps : 10 µs par carreau

Voie 1 :
- mode DC
- 20 V par carreau

Voie 2 (entre les deux curseurs figurant en pointillés) **:**
- mode AC
- 0,1V par carreau

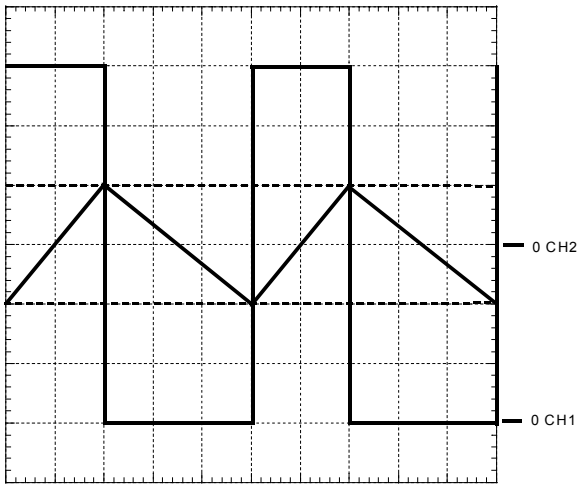

Figure 4

On s'intéresse au **fonctionnement sur une période** entre les instants 0 et T. On note αT l'instant de commutation à partir duquel la tension V vaut 0 ($V = 0$ pour $\alpha T \leq t < T$).

2.2.4.1. Représenter le circuit électrique (comprenant le moteur à courant continu) qui équivaut au montage de la figure 3 dans chaque phase de fonctionnement ($0 \leq t < \alpha T$ d'une part et $\alpha T \leq t < T$ d'autre part).

2.2.4.2. Ecrire les équations d'évolution i(t) de l'intensité du courant en fonction du temps (on notera I_m et I_M les valeurs minimale et maximale de i) :

a) pour $0 \leq t < \alpha T$

b) pour $\alpha T \leq t < T$

2.2.4.3. Représenter rapidement, sur des figures distinctes, les graphes de i_{K1} et i_{K2} en fonction du temps.

Tournez la page S.V.P.

Extrait gratuit de document, le document original comporte 19 pages.

2.2.4.4. Déduire de l'oscillogramme de la figure 4 et des conditions de réalisation de l'essai correspondant (il ne s'agit pas de l'essai initial pour lequel E = 100 V mais de celui présenté à la **question 2.2.4.**) :

a) la valeur de E_0
b) la valeur de α correspondant à l'essai réalisé
c) la valeur de E correspondant à l'essai réalisé
d) la valeur de L
e) la valeur moyenne $<i_{K1}>$ du courant débité par la source E_0
f) la valeur moyenne $<i>$ du courant circulant dans l'induit.

2.2.5. Dans le cas d'un moteur à courant continu réel (si on prend en compte la résistance R), pourquoi a-t-on intérêt, pour améliorer le rendement, à limiter l'ondulation du courant dans l'induit (c'est-à-dire à limiter les variations du courant autour de sa valeur moyenne) ?

TROISIEME PARTIE

PRINCIPE DU MOTEUR SYNCHRONE

3.1. Stator de la machine synchrone : production d'un champ tournant

On constitue un système (S_1) de deux solénoïdes identiques de même axe *Ox* et montés en série de sorte qu'un courant d'intensité i_1 circule dans le même sens dans les deux solénoïdes (figure 5).

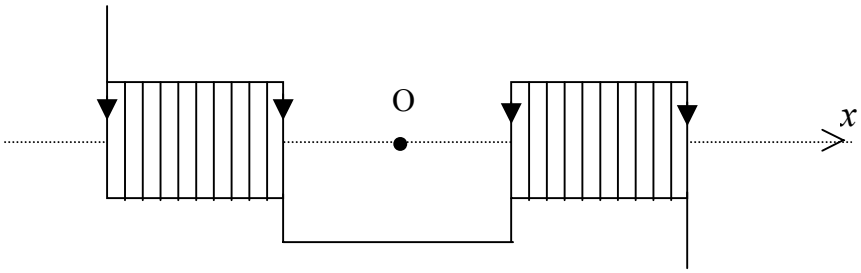

Figure 5

Dans ces conditions, le champ magnétique au centre O du système (S_1) peut se mettre sous la forme : $\overrightarrow{B_1} = K.i_1 \overrightarrow{e_x}$ (*K* est une constante et $\overrightarrow{e_x}$ est le vecteur unitaire de l'axe *Ox*).

On place maintenant deux systèmes (S_1) et (S_2) identiques au précédent selon la configuration de la figure 6 (les axes *Ox* et *Oy* de (S_1) et (S_2) sont perpendiculaires et se coupent en O).

Chacun des systèmes (S_1) et (S_2) a une résistance totale R et une inductance totale L.

Extrait gratuit de document, le document original comporte 19 pages.