

# ANALYSE ET REDUCTION DU BRUIT D'ORIGINE ELECTROMAGNETIQUE DANS LES MACHINES ELECTRIQUES - Evaluation des acquis -

Nom/Prénom du stagiaire :

Date :

## Introduction

Ces exercices illustrent les notions abordées dans la formation technique TTR01 d'EOMYS ENGINEERING sur l'analyse et la réduction des problèmes ACV (Acoustique et Vibrations) d'origine électrique survenant dans les chaînes de traction électrifiée et plus généralement dans les machines tournantes.

## A. Bruit et vibrations – généralités et application aux moteurs électriques

A1. Une machine électrique fait 80 dB en niveau de puissance sonore (mesurée par sonde d'intensité). On suppose que la machine se trouve sur le sol et dans un champ libre.

Quel est le niveau de pression sonore attendu à 2 m du centre de la machine ?

A2. Le niveau de 80 dB de la machine de A1 a été mesuré lorsque les auxiliaires (pompes, ventilation) étaient éteints. Une autre mesure montre que le niveau de puissance sonore des auxiliaires est de 70 dB.

Quel est le niveau de pression sonore total à 2 m (bruit du moteur + auxiliaires) ?

A3. Le spectre de puissance sonore est donné par une raie à 1000 Hz, 80 dB et une raie à 500 Hz, 20 dB.

Quel est le niveau global de puissance sonore en dBA ?

A4. Une analyse plus approfondie indique que la boîte électrique attachée au moteur vibre beaucoup à 500 Hz. La surface de la boîte est de  $0.5 \text{ m}^2$  et le niveau de vitesse vibratoire RMS est de 1 mm/s.

Est-ce que la vibration de la boîte contribue significativement à la puissance acoustique de 80 dB rayonnée par le moteur électrique ?

A5. Une machine asynchrone est placée au centre d'une pièce de dimensions 8m x 5m x 3m, sur le sol. Au-dessus de quelle fréquence peut-on considérer que le champ acoustique est diffus dans cette pièce ?

Les temps de reverberation sont donnés dans le tableau suivant, ainsi que les niveaux de puissance  $L_w$  is given in octave band in table. Compute the sound power level in the room at 4 m of the machine.

Frequency bands	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Time reverberation (s)	5,0	4,0	3,5	3,2	2,8	2,2
$L_w$ (dB(A) ref. $10^{-12}$ W)	90	95	100	110	105	100
Absorption coefficient $\alpha_{por}$ (-)	0,3	0,5	0,8	0,9	1,0	0,9

Porous material with absorption coefficient given in octave band (see table) is applied on the ceiling of the room. Compute the sound power level in the room after applying the absorbent material on the ceiling.

A6. Deux moteurs électriques indépendants fonctionnent dans la même pièce. Le niveau de puissance acoustique du premier moteur est de 70 dB et celui du second moteur est de 75 dB. Quel est le niveau de puissance sonore total ?

Faites le même calcul pour 70 dB et 81 dB.

## B. Génération du bruit et des vibrations d'origine électromagnétique

B1. Les efforts tangentiels peuvent-ils être source de vibration radiale de la culasse statorique ? Peuvent-ils générer du bruit via le rotor ?

B2. Sur une machine asynchrone à vide, de combien augmente un bruit de denture si le courant double ?

B3. Une machine asynchrone à  $Z_s=36$  dents statoriques,  $Z_r=28$  dents rotoriques et  $p=3$  paires de pôles possède un mode d'ovalisation (2,0) à 1200 Hz. Une résonance va-t-elle se produire ? Si oui, à quelle vitesse ?

B4. Tracer qualitativement la forme du flux fondamental ( $p=2$  paires de pôles) et des efforts radiaux résultants vus par les dents d'un stator à  $Z_s=6$  dents. Quelle est l'ordre de la déformée de la culasse ?

## C. Caractérisation analytique du bruit et des vibrations d'origine électrique

C1. Soit une machine synchrone à aimants permanents avec  $p=5$  paires de pôles et  $Z_s=12$  encoches statoriques. Quel est le plus petit nombre d'onde des efforts magnétiques en présence ? Calculer la fréquence associée de l'effort harmonique. Est-il possible de le réduire sans modifier le couple de la machine ?

C2. Une machine synchrone à aimants permanents a  $p=32$  paires de pôles et  $Z_s=72$  encoches. Quelle est la fréquence du couple de détente à 2000 rpm ? Quel sont les harmoniques de fmm rotorique responsable du couple de détente ? Cet harmonique de couple est-il dangereux d'un point de vue vibroacoustique ?

C3. Démontrer qu'à vide les rangs 11 et 13 du champ rotorique d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP) à  $Z_s=48$   $p=4$  ( $q_s=3$  phases) peuvent créer un effort pulsant d'ordre  $r=0$  à  $12f_s$ .  
Cas en charge : démontrer que des harmoniques de force magnétomotrice peuvent également créer ce type d'effort. Peut-il agir sur cet effort en charge par un changement du pas raccourci ?

C4. Quels sont les trois types d'efforts harmoniques présents dans un moteur électrique à aimants permanents ?  
Cas d'une MSAP : comment évolue chacun des types d'efforts si l'amplitude du courant est doublée ?

C5. Soit une PMSM à  $Z_s=120$   $p=10$  (nb de paires de pôles) ( $q_s=3$  phases). La machine a-t-elle un bobinage distribué ?

Tracer son spectrogramme acoustique attendu de 0 à 3000 rpm (ordonnées) et de 0 à 6400 Hz (abscisses) en y plaçant les excitations pulsantes en circuit ouvert. On rappelle que  $N=60f/p$  ( $N$  vitesse en RPM,  $f$  fréquence électrique en Hz). Placer le mode de respiration à 3 kHz. Quelles sont les résonances attendues ?

On suppose que la machine est en charge et est alimentée par une MLI asynchrone à 4kHz. Rajouter les raies MLI sur le spectrogramme. De nouvelles résonances vont-elles se produire ? Si oui à quelles vitesses en rpm ?  
Montrer que le champ statorique présent en charge rajoute une nouvelle harmonique d'effort radial pulsante à  $6f$  (on rappelle que la force magnétomotrice du stator crée des harmoniques  $-5p$  et  $+7p$ ). De nouvelles résonances vont-elles se produire ? Si oui à quelles vitesses en rpm ?

## D. Techniques de calcul vibro-acoustique sous excitations électromagnétiques

D1. Citer deux problèmes numériques liés à l'utilisation des éléments finis.

D2. Quel est le principal inconvénient de la méthode perméance/mmf ?

D3. Peut-on supposer un couplage magnétique structure faible dans le calcul du bruit électrique ?

D4. On souhaite simuler une montée en régime d'une chaîne de traction électrique synchrone ( $Z_s=48$ ,  $p=4$ ) de 20 à 10000 rpm et simuler le comportement vibro-acoustique jusque 10 kHz.

Quel est le pas de temps le plus petit à simuler ? Combien de révolutions faut-il simuler pour capturer les bandes latérales liées à l'excentricité ?

La machine possède un mode 0 à 4 kHz d'amortissement 2%, comment choisir un pas de vitesse qui permette de capturer la résonance ? En supposant qu'un couplage direct numérique électromagnétique / acoustique prenne 4 heures de simulation en éléments finis pour un point de vitesse, en déduire le temps de simulation pour une montée en régime en supposant que les calculs peuvent être parallélisés sur 10 machines. Quelle méthode peut-on utiliser pour réduire le temps de calcul ?

## E. Techniques de réduction du bruit et des vibrations issus des efforts magnétiques

E1. Un bruit important est créé par une harmonique de perméance statorique  $2Z_s$  (rang 2) : quelle est le ratio théorique entre ouverture d'encoche et ouverture de dents permettant de l'annuler ?

E2. On veut réduire le couple de détente d'une machine PMSM à  $Z_s=12$  encoches et  $p=2$  paires de pôles. Quel est l'angle optimal de décalage des aimants (en les segmentant simplement en deux parties) minimisant le couple de détente ?

Même question pour l'effort radial pulsatoire.

E3. On souhaite réduire un bruit apparaissant à  $12f_s$  sur une PMSM. Quelles sont les fréquences de courant à injecter dans le repère DQH pouvant agir sur le bruit électrique ? En supposant que le bruit est dû à un effort tournant d'ordre 4 tournant dans le même sens que le flux fondamental, et que la machine a  $p=2$  paires de pôles, en déduire la seule fréquence de courant harmonique capable de réduire le bruit.

Est-il recommandé de l'injecter suivant  $I_d$  ou  $I_q$  ?

E4. On introduit une encoche auxiliaire par dent en vue de réduire le bruit d'une PMSM à  $Z_s=12$   $p=5$ . Quel est le nouvel ordre spatial des efforts attendu ? La technique est-elle efficace ?

E5. On veut réduire le bruit et les vibrations en augmentant l'épaisseur de la culasse (augmentation du rayon externe du stator). Quels sont les 3 effets secondaires qui peuvent au contraire faire augmenter le bruit ?

## F. Caractérisation expérimentale

F1. Donner la formule permettant de calculer la fréquence naturelle de résonance sur une analyse d'ordre à partir de l'ordre mécanique  $k$  impliqué dans la résonance et de la vitesse  $N$  à la résonance (on suppose une machine synchrone).

F2. D'où viennent les vibrations en forme de V (ne passant pas par l'origine) dans un spectrogramme ?

F3. On a une vibration importante à  $2f_s$  sur une PMSM avec  $p=5$  et  $Z_s=12$ .  
Combien d'accéléromètres doit-on mettre au minimum pour capturer la déformée à  $2f_s$  ?

F4. Comment s'assurer de l'origine magnétique du bruit sur une machine asynchrone ?

F5. Un problème de bruit magnétique survient à 6 kHz sur une machine de diamètre 10cm et longueur 4cm, probablement à cause du mode d'ovalisation. A quoi doit-on faire attention lors des mesures ? A quel distance l'hypothèse d'une source sonore ponctuelle est-elle valide ?

## G. Application à MANATEE

G1. Définir la machine du tutoriel suivant :

<https://eomys.com/produits/manatee/tutoriaux/electromagnetic-and-vibro-acoustic-simulation-of-buried-permanent-magnet/>

Lancer une simulation électromagnétique et vibroacoustique en circuit ouvert avec la méthode de sous domaine.  
Tracer le bruit en pression acoustique à 2 m de la machine fonction de la vitesse.  
Déterminer l'origine de la résonance.

G2. On souhaite réduire le bruit par vrillage du rotor :

<https://eomys.com/produits/manatee/tutoriaux/electromagnetic-and-vibro-acoustic-simulation-of-buried-permanent-magnet/article/multi-simulation-rotor-stepped-skew-effect-at-no-load-variable-speed>

Tracer l'effet de l'inclinaison du rotor sur le bruit maximum en puissance acoustique.

G3. On souhaite réduire le bruit par modification des fréquences naturelles du stator.

Tracer l'effet du diamètre statorique sur le bruit maximum en puissance acoustique.