

DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS DE ROULEMENTS D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

AHMED HAMIDA BOUDINAR¹, NOUREDDINE BENOZZA²,
AZEDDINE BENDIABDELLAH³

Mots-clés: Moteur asynchrone, Diagnostic, Défauts, Roulements, Analyse spectrale, Courant statorique, Filtre anti-repliement.

La détection précoce des défauts de roulements permet d'augmenter la durée de vie des moteurs et ainsi minimiser les pertes financières. A cet effet, nous proposons dans cet article, deux approches pour améliorer l'analyse du courant statorique. La première, consiste à réaliser un filtre analogique pour améliorer la qualité du signal traité. La deuxième approche, consiste à améliorer la lisibilité du spectre. Pour cela, un algorithme de localisation de maxima est développé pour ne faire apparaître que la signature du défaut recherché. Les résultats expérimentaux obtenus montrent l'intérêt et l'efficacité des améliorations proposées.

1. INTRODUCTION

Les roulements à billes sont des organes indispensables à la grande majorité des moteurs électriques. Ils sont responsables de la conversion d'énergie jouant ainsi le rôle d'interface électromécanique. Malheureusement, ce rôle les rend plus fragiles et sont donc une source de pannes fréquentes. En effet, des études statistiques montrent qu'ils représentent entre 40% et 50% des pannes totales des moteurs et peut atteindre 52% dans certains secteurs industriels [1]. Il est donc nécessaire, de diagnostiquer très tôt les défaillances des roulements afin de préserver la sécurité du personnel, éviter l'arrêt de toute la chaîne de production, et ainsi minimiser les pertes financières [2, 3].

Parmi les techniques de diagnostic, l'analyse du courant statorique est une approche très prometteuse, vu que ses principaux atouts résident dans l'instrumentation employée, la facilité de sa mise en œuvre ainsi que la richesse d'informations qu'elle procure sur l'état du moteur. Pour faire apparaître cette richesse d'informations, plusieurs méthodes de traitement du signal ont été

¹ Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Laboratoire de Développement des Entraînements Electriques, USTO MB BP 1505 Oran El M'Naouer Algérie, E-mail: boud_ah@yahoo.fr

² E-mail : benouza@yahoo.com

³ E-mail : bendiaz@yahoo.fr

développées. Les plus utilisées dans le domaine industriel sont celles basées sur l'estimation de la Densité Spectrale de puissance (DSP) [4]. Cependant, la DSP présente plusieurs inconvénients qui sont dus essentiellement au problème de la résolution fréquentielle et de la fenêtre de pondération choisie [4, 5]. De plus, la richesse du spectre du courant statorique n'implique pas que tous les harmoniques reflètent l'état du moteur. Certains harmoniques peuvent par exemple représenter des parasites électromagnétiques qui n'ont pas été correctement filtrés lors de l'acquisition du courant.

Dans cet article, nous allons présenter deux approches pour améliorer le diagnostic des défauts de roulements. La première consiste à réaliser un filtre analogique passe-bas plus connu sous le nom de filtre anti-repliement (FAR) en traitement du signal. Ce filtre sera placé dans la chaîne d'acquisition pour purifier le contenu du courant des fréquences indésirables et donc améliorer la qualité du traitement. La deuxième solution concerne l'amélioration apportée à la lisibilité du spectre du courant par l'ajout au calcul de la DSP d'un algorithme de localisation de maxima sur une bande fréquentielle déterminée afin de détecter la signature du défaut recherché. Pour valider l'intérêt et l'efficacité des améliorations proposées, des tests expérimentaux seront effectués sur le défaut de la bague externe, vu qu'il représente 39% des défauts de roulements selon certaines études statistiques [6].

2. SIGNATURE FRÉQUENTIELLE DU DÉFAUT DE LA BAGUE EXTERNE

La défaillance d'un roulement se manifeste par des ondulations de surface des billes, par des fissures dans les deux bagues « interne et externe » ou par la détérioration de la cage. La détection de ces défauts a été largement étudiée à l'aide de la technique vibratoire [7, 8]. Malheureusement, la fiabilité des résultats est fortement liée à la position des accéléromètres sur les paliers. En revanche, l'analyse des courants statoriques s'est avérée être très intéressante, car elle permet de diagnostiquer aussi bien les défauts électriques que mécaniques [7, 9]. De plus, la mesure du courant peut être prise à n'importe quelle position entre le moteur et le poste d'alimentation. Par ailleurs, Schoen et ses coauteurs [7], ont démontré qu'une défaillance des roulements se manifeste dans le spectre du courant statorique sous la forme d'harmoniques définis par l'expression suivante:

$$f_{\text{roul}} \text{ (Hz)} = |f_a \pm k \cdot f_{\text{bague,ext}}|, \quad (1)$$

ou f_a est la fréquence d'alimentation (50Hz), $k = 1, 2, 3 \dots$ et $f_{\text{bague,ext}}$ est la fréquence caractéristique des vibrations induites par le défaut de la bague externe. Plusieurs études [2, 7] ont démontré que cette fréquence caractéristique du défaut de la bague externe est définie comme suite:

$$f_{\text{bague,ext}} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta\right), \quad (2)$$

où f_r est la fréquence de rotation du moteur et d'après la figure 1 qui représente la géométrie du roulement, N_b est le nombre de billes, D_b et D_c sont respectivement le diamètre de la bille et de la cage, β étant l'angle de contact (Fig. 1).

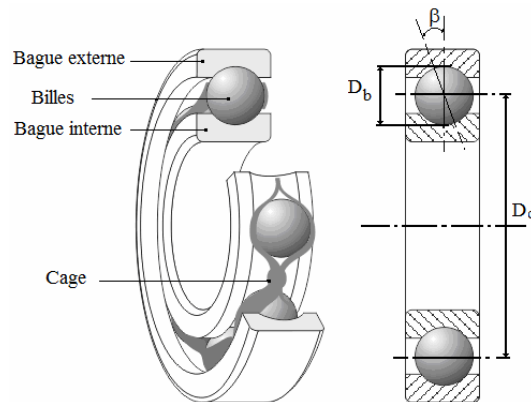


Fig. 1 – Géométrie du roulement à billes.

3. AMÉLIORATIONS PROPOSÉES

3.1. LE FILTRE ANTI-REPLIEMENT

Les capteurs des courants statoriques sont généralement placés dans un environnement pollué. En effet, les machines et les convertisseurs statiques rayonnent des champs électromagnétiques pouvant induire des interférences, créant ainsi un bruit additif à la mesure. Certaines fréquences de ce bruit, peuvent apparaître au niveau du spectre du courant lors de sa numérisation à cause d'un mauvais choix de la fréquence d'échantillonnage. Ce phénomène est appelé repliement spectral. Figure 2 montre la chaîne d'acquisition des courants.

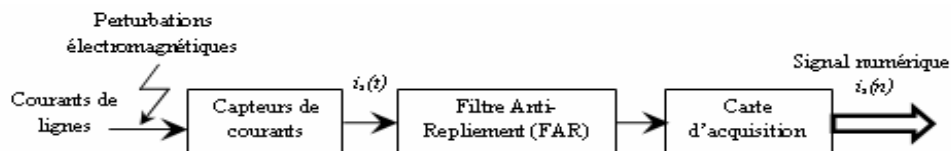


Fig. 2 – La chaîne d'acquisition des courants statoriques.

Afin d'éliminer ces parasites, nous avons réalisé un filtre anti-repliement (FAR) spécifique à notre application. C'est un filtre passe-bas à 04 voies, de type Butterworth, du 4^{ème} ordre et de fréquence de coupure réglable selon le type du défaut à traiter (voir schéma synoptique et photo du FAR en annexe).

3.2 ALGORITHME DE LOCALISATION DES MAXIMA.

La deuxième amélioration que nous proposons est l'ajout au calcul de la DSP d'un algorithme permettant de localiser numériquement l'harmonique reflétant la présence du défaut. Cet algorithme ne sera appliqué qu'à la bande fréquentielle pouvant faire apparaître sa signature. A noter que le choix de cette bande dépend du type du défaut recherché, des dimensions du roulement et de la fréquence de rotation. Cette solution permettra d'apporter une meilleure lisibilité du spectre et une fiabilité d'analyse surtout si le défaut est naissant.

Par ailleurs, dans la pratique, la signature d'un défaut apparaît sur les trois courants de lignes. Pour cette raison, nous proposons l'analyse spectrale de la combinaison des trois courants par la composante directe I_{sd} [9].

$$I_{sd} = \frac{I_a + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot I_b + e^{j\frac{4\pi}{3}} \cdot I_c}{3}, \quad (3)$$

où I_a , I_b et I_c sont les spectres des courants de lignes respectifs.

Procédure de diagnostic des défauts de roulements:

1. Choisir la fréquence de coupure du FAR.
2. Acquérir les trois courants de lignes.
3. Calculer la composante directe I_{sd} .
4. Choisir la bande fréquentielle à analyser.
5. Localiser l'harmonique maximal sur la bande fréquentielle choisie.
6. Vérifier si la fréquence localisée correspond à celle obtenue par calcul théorique.

4. RÉSULTATS EXPERIMENTAUX

Le moteur utilisé dans ces essais est de type triphasé à cage d'écureuil, d'une puissance nominale de 3 kW, de fréquence 50 Hz et dont la vitesse rotorique nominale est de 1440 trs/min. Ce moteur est accouplé à une génératrice à courant continu utilisée comme charge. La chaîne de mesures comporte trois capteurs de courant à effet hall (Fluck i30s), du FAR réalisé « pour nos tests, on a choisi une fréquence de coupure de 400 Hz », d'un tachymètre (Ono Sokki HT-341) et d'une carte d'acquisition (NI-6330). Enfin, un ordinateur est utilisé pour le traitement des signaux acquis. Figure 3 représente le banc d'essais.

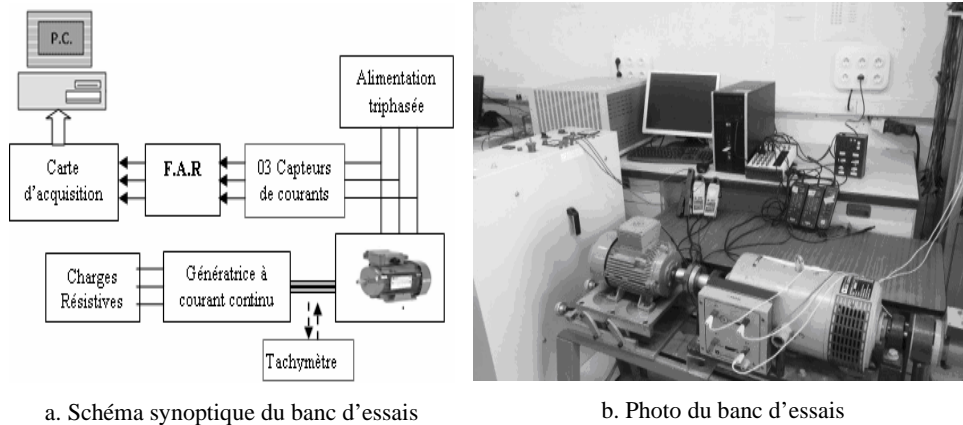
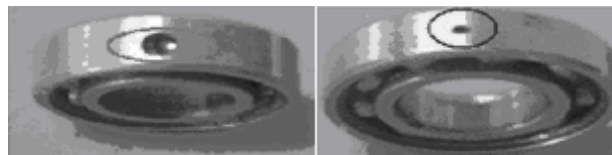


Fig. 3 –Banc d'essais réalisé.

Toutes les acquisitions ont été réalisées en régime nominal sur une durée de 40 secondes avec une fréquence d'échantillonnage de 1.5 kHz, soit une résolution fréquentielle égale à 0.025 Hz. Le roulement diagnostiqué est de type 6205-ZZ dont les paramètres sont: $N_b = 9$ billes, $D_b = 7.938$ mm, $D_c = 38.5$ mm et $\beta \approx 0$. Les défauts de roulement traités dans cet article sont ceux de la bague externe. Ils sont créés artificiellement par perçage, comme c'est représenté par Fig. 4.



a. Défaut de 6 mm

b. Défaut de 3 mm

Fig. 4 –Défauts de roulement de la bague externe.

Les différents modes de fonctionnement du moteur réalisés pour valider la procédure de diagnostic sont:

- fonctionnement avec des roulements sains;
- fonctionnement avec un défaut de la bague externe « un trou de 6 mm »;
- fonctionnement avec un défaut de la bague externe « un trou de 3 mm ».

4.1. FONCTIONNEMENT AVEC DES ROULEMENTS SAINS

Dans cette première étape, nous allons analyser le courant statorique dans le cas où les deux roulements sont sans défectuosité apparente. Cette analyse sera considérée comme la référence de tous les prochains tests.

Impacts du filtre anti-repliement réalisé sur la qualité du signal

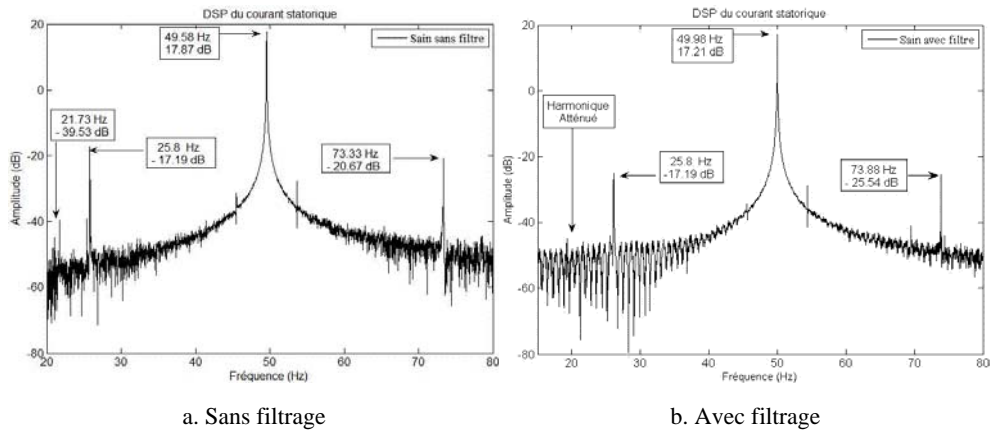


Fig. 5 – Impact du FAR sur l'atténuation des perturbations transitoires (roulements sains)

D'après Fig. 5a, la DSP du courant sans FAR, montre la présence d'un harmonique à la fréquence 21.73 Hz. Par contre, ce même harmonique est fortement atténué avec l'utilisation du FAR d'après Fig. 5b, ce qui démontre que cette fréquence n'est qu'une perturbation parasite qui est apparue à cause du repliement spectral. Par contre, les autres harmoniques représentant l'état du moteur (fondamental, excentricités...), ne sont pas touchés par le filtre.

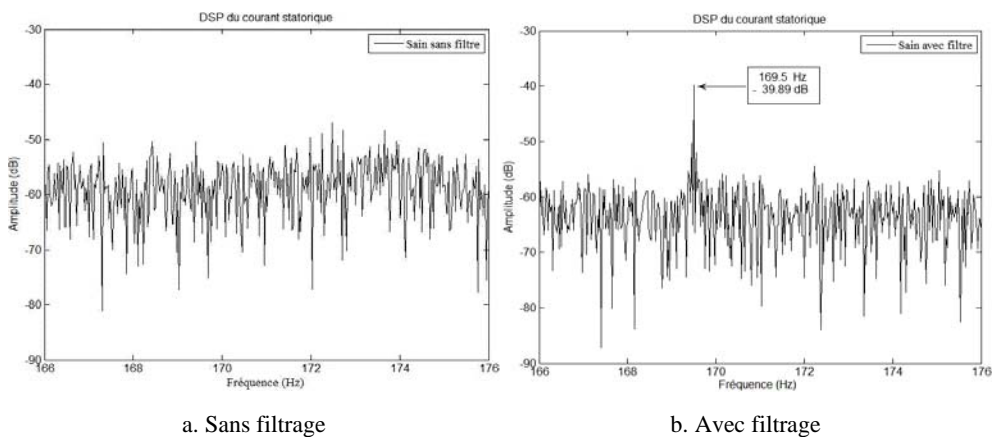


Fig. 6 – Impact du FAR sur l'atténuation du bruit (moteur avec roulements sains).

De plus, d'après Fig. 6, nous remarquons que le bruit moyen sans FAR est de -60dB . Par contre avec le FAR, il est de -65dB . Cette diminution a permis de rendre la fréquence 169.5 Hz plus lisible. Ce double impact montre tous les bienfaits du FAR réalisé sur la qualité de l'analyse.

Par ailleurs, en se basant sur les équations (1) et (2), le tableau 1 donne la fréquence théorique du défaut de la bague externe s'il existe.

Tableau 1

Fréquence caractéristique théorique du défaut de la bague externe « à charge nominale »

Type du défaut	Signature fréquentielle « $f_r=23.69\text{ Hz}$ et $k=1$ »
Bague externe	34.66 Hz

À partir de ce tableau, on peut dire que la bande fréquentielle à analyser susceptible d'apporter des informations sur l'existence du défaut de la bague externe, peut être limitée à $[30\text{Hz}, 40\text{Hz}]$. C'est sur cette bande fréquentielle que la recherche de la signature du défaut sera effectuée. Figure 7 représente l'analyse du courant sur la bande fréquentielle choisie. Elle montre qu'aucun harmonique particulier ne se détache du spectre pouvant faire dire qu'il y a un défaut.

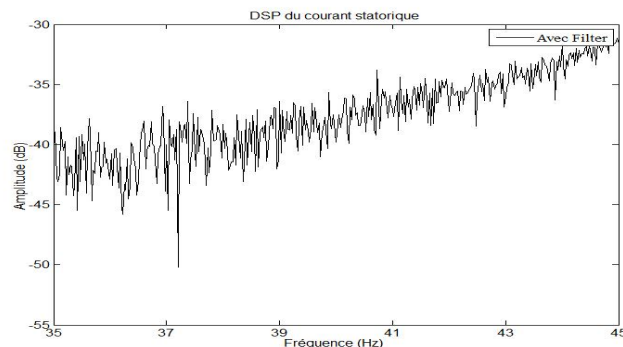


Fig. 7 – Spectre du courant statorique (moteur avec roulements sains).

4.2. FONCTIONNEMENT AVEC UN DÉFAUT DE LA BAGUE EXTERNE

Figure 8a montre qu'une fréquence se détache du reste de l'étendu spectrale comparativement au spectre du moteur avec roulements sains (Fig. 7). Cette fréquence obtenue expérimentalement démontre l'existence possible du défaut de la bague externe d'après les calculs théoriques obtenus dans le Tableau 1. Cet harmonique est plus ou moins lisible vu l'ampleur du défaut réalisé (un trou de 6 mm). Par contre avec un trou de 3 mm , il est pratiquement impossible de voir sa signature avec un tel tracé comme le montre Fig. 8b.

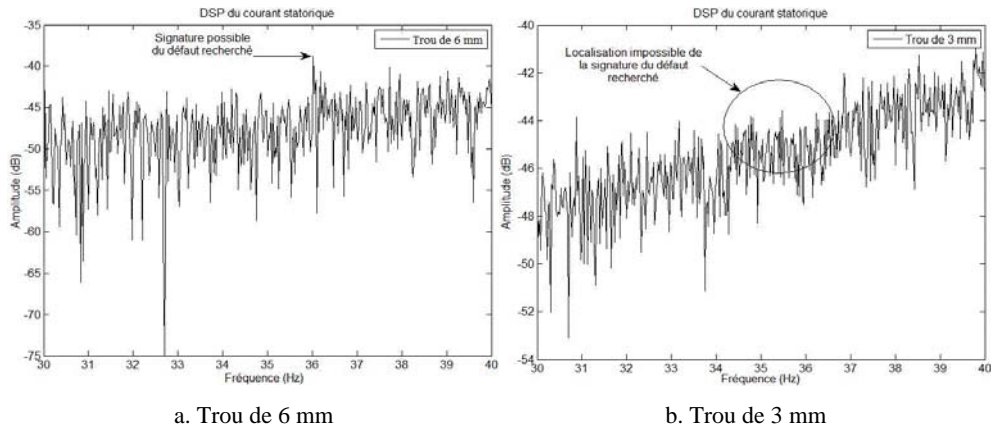


Fig. 8 – Spectre du courant statorique du moteur avec défaut de la bague externe.

☞ Impact de l'algorithme de localisation de maxima sur la lisibilité du spectre

En appliquant la solution proposée, on remarque que la signature du défaut de la bague externe apparaît clairement à la fréquence 35.8 Hz indépendamment du diamètre du trou réalisé comme le montre Fig. 9. Ceci confirme les résultats théoriques (voir tableau1). Cette légère différence entre la fréquence théorique de (34.66 Hz) et celle obtenue (35.8 Hz) est due à la résolution fréquentielle choisie et à l'erreur de mesure de la vitesse mécanique de rotation par le tachymètre. On remarque aussi, d'après Fig. 9a, que l'amplitude de l'harmonique obtenue est plus grande que celle de Fig. 9b. Ceci est tout à fait normal vu la différence des diamètres des deux trous réalisés. Cette information est d'une importance capitale pour le suivi de la sévérité des défauts.

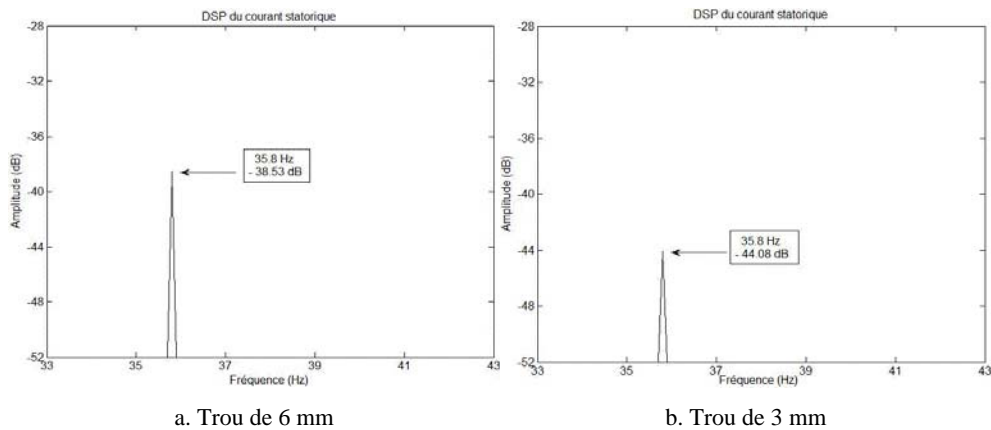
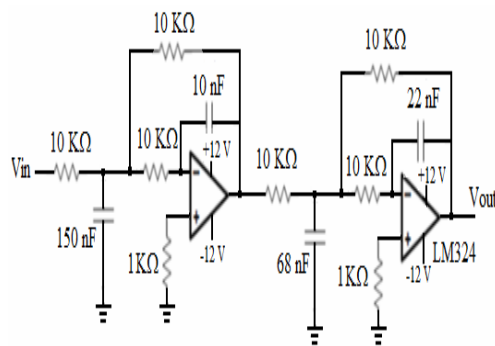


Fig. 9 – Spectre du courant statorique du moteur avec défaut de la bague externe.

5. CONCLUSION

Afin d'améliorer la qualité du diagnostic des défauts de roulements, nous avons présenté dans cet article deux solutions. Premièrement, la réalisation d'un filtre anti-repliement adapté au traitement désiré, a permis d'éliminer certaines perturbations électromagnétiques et à diminuer l'effet du bruit de mesures, ce qui a eu un impact direct sur la fiabilité du diagnostic. Deuxièmement, l'ajout d'un algorithme de localisation de maxima à l'estimation de la densité spectrale de puissance du courant statorique a permis une meilleure lisibilité du spectre et une rapidité dans la décision car on peut affirmer directement si l'harmonique obtenu représente ou pas la signature du défaut recherché sans faire de zooms successifs.

ANNEXE



a. Schéma synoptique d'une voie du FAR
(fréquence de coupure égale à 400Hz)



b. Photo du FAR

Fig. 10 – Filtre anti-repliement (FAR).

Reçu le 6 septembre 2014

BIBLIOGRAPHIE

1. O. V. Thorsen and M. Dalva, *Failure Identification and Analysis for High Voltage Induction Motors in the Petrochemical Industry*, IEEE Transactions on Industry Applications, **35**, 4, pp. 810–818, 1999.
2. H. A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, H. Meshgin-Kelm, *Electric machines. Modeling, condition monitoring and fault diagnosis*, CRC Press and Taylor & Francis Group, édition 2012.
3. A. Simion, L. Livadaru, R. V. Cociu, A. Munteanu, *study of the three-phase induction machine under dynamic braking*, Rev. Roum. Sci. Techn. – Electrotechn. et Energ., **58**, 3, pp. 273–283, 2013.

4. A. F. Aimer, A. H. Boudinar A. Bendiabdellah, C. Mokhtar, *Effet du fenêtrage sur la résolution de la DSP et son apport dans le diagnostic des défauts rotoriques du moteur asynchrone*, International Conference on Industrial Engineering and Manufacturing (ICIEM' 10), May 9–10, 2010, Batna, Algeria.
5. D. Belega, D. Dallet, D. Stoiciu, *Choice of the window used in the interpolated discrete fourier transform method*, Rev. Roum. Sci. Techn. – Electrotechn. et Energ., **54**, 4, pp. 365–374, 2009.
6. *** *Improved motors for utility applications final report publication*, EL-2678, Vol. 1.1, 1763-1, EPRI, October 1982.
7. R. Schoen, T. G. Habetler, F. Kamran, and R. G. Bartheld, *Motor bearing damage detection using stator current monitoring*, IEEE Transaction on Industry Applications, **31**, 6, pp. 1274–279, 1995.
8. D. Rezmires and C. Racoccea, *Quasi-Dynamic Effects in Ball Bearings with 2, 3 or 4 Contact Points*, 15th International Conference on Manufacturing Systems (ICMaS'2006), October 26–27, 2006, Bucharest, Romania, pp. 239–242.
9. A. H. Boudinar, A. Bendiabdellah, N. Benouzza, N. Boughanmi, *Three phase induction motor incipient rotor's faults detection based on improved Root-MUSIC approach*, International Review of Electrical Engineering, **2**, 3 pp. 406–413, 2007.

BEARING FAULT DIAGNOSIS OF INDUCTION MOTOR

Key words: Induction motor, Diagnosis, Bearing, Spectral analysis, Stator current, Anti-aliasing filter.

Early detection of bearing faults increases the life of the motors and thus avoids unnecessary financial losses. In this paper, we propose two approaches to improve data analysis. Firstly, a designed and realized low-pass filter is inserted in the acquisition chain so as to improve the processed signals quality. Secondly, an algorithm for the maxima localization is added to the power spectral density estimation on a given frequency band. This solution improves the readability of the stator current spectrum. Experimental results are presented to illustrate the merits of the proposed improvements.