

## ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ДИАГНОСТИКА НА АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ С ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ПРОФИЛНА МАТРИЦА НА СТАТОРНИЯ ТОК

Юлиян Йорданов<sup>1</sup>, Валентин Гюров<sup>2</sup>

<sup>12</sup>Технически университет-Варна, кат. „Електроснабвяване и електрообзавеждане”

## POSSIBILITIES FOR DIAGNOSIS OF ASYNCHRONOUS MOTORS WITH THE USE OF PROFILE MATRIX OF STATOR CURRENT

Yulian Yordanov<sup>1</sup>, Valentin Gyurov<sup>2</sup>

<sup>12</sup>Technical University of Varna, Department of Electric Power Supply and Electrical Equipment

### Abstract

The study presents an idea for application of new approach in diagnosis of asynchronous motors with the use of profile matrix of stator current. The profile matrix includes 7 specific frequencies from fault frequency signatures analysis and can be used for indication of deviation from normal regime condition of motor. The approach will give new opportunity for predictive maintenance of electrical equipment with asynchronous motors.

**Keywords:** diagnosis of asynchronous motor, fault signature analysis of stator current, maintenance of asynchronous motors

### ВЪВЕДЕНИЕ

Диагностиката на асинхронни електро-двигатели с накъсо съединен ротор чрез спектрален анализ на статорния ток и мощността е познат и широкоприложим подход. Изследванията и стандартите приложими в тази област описват различните признаци и методи за анализ на състоянието на този тип електрически машини за определяне на видовете дефекти възникващи по време на експлоатация. В настоящия доклад се представят основните критерии и методи за оценка на величините, като се предлага нов подход за анализ на експлоатационното състояние на асинхронни двигатели, ползващ профилна матрица, съдържаща характерни честоти на статорния ток и се извършва мониторинг на изменението на членовете на матрицата, спрямо естествените трендове на изменение.

### ИЗЛОЖЕНИЕ

Проучванията за надеждност показват, че най-уязвимите части на асинхронния двигател са лагерните възли, намотките на

статора и ротора. За диагностика на тези дефекти са разработени стационарни и преносими диагностични системи, които могат да се използват за наблюдение на състоянието на асинхронните двигатели (АД). Оценка на състоянието на АД може да се направи чрез анализ на измерените електрически величини. Установените в анализа несъответствия (изменения) на тока, напрежението и мощността, могат да са в резултат на влиянието на задвижваното оборудване. Следователно, анализа на електрическите величини, може да се приложи и за оценяване на състоянието на задвижваното оборудване.

1. Определяне на характерните дефекти

Чрез спектрален анализ на тока (current signature analysis) могат да установят следните проблеми при АД с кафезен ротор [1,3,4];

- пукнатини в прътите на ротора;
- прекъснати пръти на ротор;
- прекъснати късосъединителни пръстени и пукнатини по тях;
- повишена ексцентричност на въздушната междина;

- дефекти на търкалящите елементи на лагерите;
- несъосност;
- късосъединени статорни намотки;
- проблеми в задивжвания механизъм.

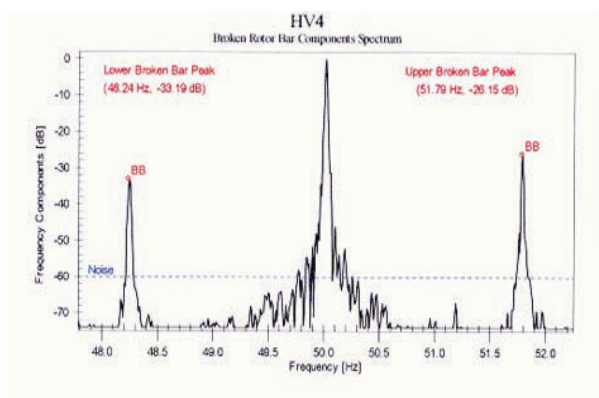
### 1.1. Прекъсвания в роторната намотка

Токът в статорната намотка, зависи не само от захранването и от импеданса на намотката, но и от тока, индуциран в намотката на статора от магнитното поле на ротора. Основен проблем в диагностиката е разделянето на тока на две характерни компоненти - ток протичащ през статора необходим за задвижването на ротора и ток, който роторът индуцира обратно в статора при наличие на определена повреда. Това разделяне се извършва, чрез измерване и определяне на честотните компоненти на тока, различни от честотата на захранване, използвайки честотен анализатор с висока разделителна способност. В стандарт ISO20958-2013 тези честотни компоненти се определят съгласно формула (1).

$$f = f_1 \cdot (1 \pm 2ks) \quad (1)$$

където:  $s$  – хлъзгане;  $f_1$  - честота на захранващата мрежа;  $k=1, 2, 3...$

Примерно спектрално разпределение при прекъсвания в роторните пръти е показано на Фигура 1.[3]



**Фиг. 1.** Спектър на тока при наличие на прекъснати роторни пръти (източник- ISO 20958-2013)

1.2. Късосъединени навивки на намотките на АД на ниско напрежение. При този дефект се генерират хармоници на тока [1,3,5,6], получени от формула (2)

$$f_{st} = f_1 \cdot \left( \frac{n}{p} (1-s) \pm k \right) \quad (2)$$

където:  $f_{st}$  - честотни компоненти на тока на статора, при наличие на късосъединени навивки;  $f_1$  - честотата на захранващата мрежа [Hz];  $n - 1, 3, 5...$ ;  $k-1, 3, 5...$ ;  $s$ -хлъзгане.

### 1.3. Мониторинг на състоянието на лагерите

Търкалящите елементи на лагерите се проявяват с характерни честоти в спектъра на тока при наличието на конкретен дефект. Тези честоти са функция на размера на лагера и вида и местоположението на дефекта. Могат да бъдат наблюдавани дефекти на външна, вътрешна гривна и търкалящите елементи на лагера. Формулите за определянето им при сачмени лагери са дадени в Таблица 1, и могат да се използват за определяне на наличието на такива дефекти, ако размерите на лагерите и броят на сачмите са известни [2,3].

Място на повредата	Характерна честота
Сачма	$f_{rb} = \left( \frac{D_{pit}}{D_{ball}} \right) \cdot f_m \cdot \left( 1 - 2 \cdot \left( \frac{D_{ball}}{D_{pit} \cdot \cos \beta} \right) \right)$
Външна гривна	$f_{ro} = \left( \frac{n}{2} \right) \cdot f_m \cdot \left( 1 - \frac{D_{ball}}{D_{pit} \cdot \cos \beta} \right)$
Вътрешна гривна	$f_{ri} = \left( \frac{n}{2} \right) \cdot f_m \cdot \left( 1 + \frac{D_{ball}}{D_{pit} \cdot \cos \beta} \right)$

**Таблица 1**

където:  $f_m$ -честота на въртене на ротора [Hz];  $n$  – брой сачми;  $\beta$  – контактен ъгъл [deg];  $D_{pit}$  - среден диаметър [mm];  $D_{ball}$  - диаметър на сачмите.

Вътрешните и външните дефекти на честоти, определени по формулите дадени в таблицата по-горе, приблизително могат да бъдат изчислени от Формула 3 и Формула 4, ако броят на сачмите е между 6 и 19.

$$f_{ro} = 0.4 \cdot n \cdot f_{rot} \quad (3)$$

$$f_{ri} = 0.6 \cdot n \cdot f_{rot} \quad (4)$$

1.4. Влияние на несъосност и дебаланс при диагностиката на АД.

Сред често срещаните проблеми в промишлените агрегати е наличието на несъос-

ност, която от своя страна предизвиква усилване на вибрациите, повишаване на усилието във лагерните възли и съответно бързото им износване. Промените в ексцентритетите на въздушната междина при подобен вид несъответствия водят до промени във вълновата форма на потока. При динамична ексцентричност позицията на ротора може да варира и всяко колебание в радиално направление води до изменение на потока на разсейване в въздушната междина. Следователно, това може да предизвика появата статорен ток с честота характерна за ексцентритет. При анализа на честотните компоненти на статорния ток механичният дебаланс се установява чрез определяне на скоростите на преминаване на роторните канали. Предвид особеностите на топлинния дебаланс, този метод на диагностика дава някой предимства.

Установяването на дебаланс при липса на други дефекти във вибродиагностиката, е свързано с нарастването на 1-ви хармоник на честота на въртене във спектъра на вибрациите. В случай на наличието на множество други дефекти със същите признаци в спектъра на вибросигнала затруднява диагностиката при работеща машина без възможност за промяна на скоростта. Използването на спектрален анализ на тока дава възможност да се установи топлинния дебаланс, както и ексцентритета, в резултат на повреди в роторната намотка по време на работа и така да се установи източника на проблема и неговата значимост [1,3,5,6].

В спектъра на тока при дебаланс се проявява следните характерни честоти [1,3,4]:

$$f_{un} = z_r \cdot f_r \quad (5)$$

където:  $f_{un}$  - характерна честота на при поява при наличие на дебаланс [Hz];  $f_r$  - честота на въртене [Hz];  $z_r$  - брой роторни канали;

$$f_{sb} = f_{un} \pm f_{st} \quad (6)$$

където:  $f_{sb}$  - странични честотни компоненти;  $f_{st}$  - честота на захранващата мрежа.

1.5. Мониторинг на ексцентритета на въздушната междина

Възможността за идентифицирането на ексцентричност на въздушната междина се дава от съставяне на характерен модел на компонентите на тока, които са в резултат на повишаване на ексцентритета между ротор и статор (промяна във въздушната междина извън допустимите граници). Специфичните честоти в спектъра на тока, указващи за отклонения от нормалните стойности на ексцентритета на въздушната междина, могат да бъдат изчислени от Формула 7.

$$f_{ec} = f_1 \left( R_s \frac{1-s}{p} \pm n_{wz} \right) \pm f_1 \left( \frac{1-s}{p} \right) \quad (7)$$

където:  $f_{ec}$  - честотни компоненти резултат от ексцентритета на въздушната междина [Hz];  $f_1$  - честотата на захранващата мрежа [Hz];  $R_s$  - брой роторни пръти;  $n_{wz}$ -1,3,5...;  $s$ - хлъзгане;  $p$  - брой чифтове полюси. [3]

Формулата се състои от две части - честотата на преминаване на роторния канал  $f_{rs}$  и честота на въртене на ротора  $f_r$ . [3]

$$f_{rs} = f_1 \left( R_s \frac{1-s}{p} \pm n_{wz} \right) \quad (8)$$

$$f_r = f_1 \left( \frac{1-s}{p} \right) \quad (9)$$

Ексцентритетът на въздушната междина дава серия от честотни компоненти в спектъра на тока, при преминаването на роторните канали получен от формула (8) с странични честоти на  $\pm f_r$ .

При наличие на динамичен ексцентритет, позицията на ротора се променя и всяко колебание в радиално направление води до изменение на потока на разсейване в въздушната междина [1,3,5]. В статора се индуцира ток с честоти, определени от Формула 10.

$$f_e = f_1 \pm m \cdot f_r \quad (10)$$

където:  $f_1$  - честота на захранващата мрежа [Hz];  $f_r$  - оборотна честота на ротора [Hz];

m- номер на хармоника;  $f_e$  - честотен компонент, дължащ се на промените във въздушната междина.

2. Възможности за диагностика чрез използване на профилна матрица като индикатор на състоянието

В т. 1. са представени характерни честоти на статорния ток, появата на които може да бъде индикатор за наличие на съответен дефект. От практическа гледна точка съществува проблема, че нивото на допустимите амплитудите на тези хармоници не е нормирано и това е предпоставка за наличие на субективен характер в диагностиката. В настоящото изследване се предлага тезата за възможна дефиниция на матрица от вида (11), чиито членове са характерните хармонични компоненти на тока. Тази матрица се именува като „профилна матрица”  $M_p$  за индикация на състоянието. Дефинициите във формули от (1) до (10) предполагат появата на безкраен ред хармонци на тока. За опростяване на изследването те ще бъдат изследвани при  $k=1$ , т.к. появата на хармонични съставлящи от по-висок ред винаги е свързано с наличието на  $k=1$ . В зависимост от нуждите на изследването в размерността на матрицата могат да се включат всички дефинирани характерни честоти или част от тях. Тъй като най-често проявяващи са механичните дефекти, а те от своя страна винаги се отрязават на ексцентритета, по-долу идеята ще бъде предложена чрез профилна матрица индикираща характерните честоти, настъпващи при ексцентритет на ротора.

$$M_p = \begin{pmatrix} If_{rs+} \\ If_{rs-} \\ If_r \\ If_{e+} \\ If_{e-} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{pmatrix} \quad (11)$$

където:  $y_h$  – характерни контролирани честоти. В конкретния случай  $h=1..m$ ;  $m=5$  – брой контролирани характерни честоти.

Съществува възможност за осъществяване на практическо измерване на даден наблюдаван асинхронен двигател по време на експлоатацията му и снемане на профилната матрица през определени периоди от време. Предлага се съставянето на математическо модели за естественото изменение

на всяка от контролираните хармонични съставлящи елементи от матрицата на база експериментални измервания през фиксиран период от време и методите на регресионния анализ. При подходящо дефиниране на началната профилна матрица (например след проведен ремонт, първоначални изпитания и пускане в експлоатация и/или пускови изпитания и запускане на ново съоръжение в експлоатация), подходящи интервали между отделните записи (предлага се веднъж седмично) и подходящ брой снети профилни матрици (предлага се  $n=5$  на брой) е възможно получаването на регресионни модели с полиноми, които могат да служат за индикатор за естественото изменение на величините по време на експлоатация от естествена амортизация. Получаването на регресионни модели за изменението на всеки елемент от матрицата може да се осъществи по следния начин:

- На база на експериментално получените стойности  $y_i$  за момент от време  $t_i$  се търси интерполационен полином от вида (12)

$$L_n(t) = \sum_{i=0}^n y_i \cdot F_i(t) \quad (12)$$

където:  $F_i(t)$  са коефициенти на Лагранж, определени по формула (13)

$$F_i(t) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{(t - t_j)}{(t_i - t_j)} \quad (13)$$

Пълният запис на Формула 12 се дава чрез Формула 14.

$$L_n(t) = \sum_{i=0}^n y_i \cdot \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{(t - t_j)}{(t_i - t_j)} \quad (14)$$

По този начин естественото изменение на величините, елементи на  $M_p$ , за изследвания период ще може да се опише с полиноми от вида (14), съответстващи на броя величини. За всеки един възел на интерполация  $t_i$ , стойността на  $L_n(t)$  е  $y_i$

Това означава, че с използването на съвременна измервателна система, отчитаща исканите характерни честоти и използването на настоящия подход е възможно да се дефинира начална профилна ма-

трица и да се построят регресионни модели показващи естественото ѝ изменение.

Изменението на профилната матрица може да бъде описано чрез Формула (15):

$$M_P(t) = \begin{pmatrix} L_n(t)_1 \\ L_n(t)_2 \\ L_n(t)_3 \\ L_n(t)_4 \\ L_n(t)_5 \end{pmatrix} \quad (15)$$

С използването на математическа екстраполация може да се предвиди стойността на всяка от величините елементи на  $M_P$  в следващ момент от време  $t^*$  съответстващ на измерване  $n+1$ , описано с формула (16)

$$y(t^*) = y_{n-1} + \frac{t^* - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \cdot (y_n - y_{n-1}) \quad (16)$$

При практическа употреба се предлага снемането на профилна матрица от експериментални данни в момента  $t^*$ , сравняването ѝ с получените данни чрез употребата на формула (15) и с тази, получена в момента  $t_1$ .

Предложеният подход позволява да се построи модел, чрез който да се следи не само наличието на определени характерни честоти, индикиращи възможната поява на дефект, а и да се следи изменението им, като се сравнява с модел за естественото им изменение по време на нормална експлоатация и амортизация.

Ефективното използване на подхода изисква разработването и използването на специализирано софтуерно приложение в комбинация със съвременни измервателни устройства са събиране и запис на данни (DAQ)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представеното изследване разглежда възможност за дефиниране на профилна матрица  $M_P$  за анализ на състоянието асинхронни двигатели по време на нормалната им експлоатация и диагностика – следремонтна или планова. Предлага се използването на подход за употреба – съставянето ѝ при пускане в експлоатация и периодични измервания в петседмичен интервал за изследване изменението ѝ и съставянето на

регресионни модели за естественият „шум“ в хармоничния състав на статорния ток. Разглежда се възможността изменението на нивата на определени хармонични, сравнени с математически модели за тяхното изменение, начален профил и профил получен в последващ момент от време, да бъдат използвани като индикатор за отчитане на вероятност за поява на дефект или увеличаване на вероятността за неговата поява.

Установяването на правилността на подхода при практическата му реализация е свързана с дефиниране на бъдещи прагови нива за изменение на величините  $\Delta u_i$  обвързани с количествена оценка за вероятността на настъпване на характерен дефект. Предложеният подход може да бъде прилаган за диагностика на агрегати в трудно достъпни за друг вид диагностика обекти или като допълнение на такава, в условията на постоянно натоварване. Използваният профил по време на експлоатация може да се използва и при приемане след ремонт за установяване качеството на ремонта и монтажа на агрегата.

*Разработката е част от проект ФНИ ТУ-Варна НП4/2018 „Теоретични и експериментални изследвания при експлоатацията и диагностиката на промишлени производствени агрегати с асинхронни електродвигатели“.*

## REFERENCE

- [1] Barkov, A., N. Barkova, A. Borisov, V. Fedoristev, D. Gristenko, Metodika diagnostirovanie mehanizmov s elektgroprivodom po potrebliaemomu toku, ISBN 978-5-91498-028-2012.
- [2] ISO 13379-2015, Condition monitoring and diagnostics of machines — Data interpretation and diagnostics techniques.
- [3] ISO 20958-2013, Condition monitoring and diagnostics of machine systems - Electrical signature analysis of three-phase induction motors.
- [4] Petuhov, V., Diagnostika sostoianie elektrodvigatetej. Metod spektralnovo analiza potrebliaemogo toka” jurnal “Novosti Elektrotehniki” №1-2005.
- [5] Thomson W.T., & Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults. IEEE Ind. Appl. Mag. 2001, 7 (4) pp. 26–34.
- [6] Thomson W., Fenger M., Lloyd B., Development of a tool to detect faults in induction motors

via current signature analysis, 2003 IEEE-  
IAS/PCA Cement Industry Conference, Dallas,  
TX, 2003-05-04/09.  
[7] Thomson W., & Gilmore R., Motor current

signature analysis to detect faults in induction  
motors — Fundamentals, data interpretation and  
industrial case histories. In: Proceedings of the  
32nd Turbomachinery Conference, 2003.