

СТЕНД ЗА ФИЗИЧЕСКА СИМУЛАЦИЯ НА ДЕФЕКТИ В ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ С АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ ЧРЕЗ СПЕКТРАЛЕН АНАЛИЗ НА СТАТОРНИЯ ТОК

Юлиян Йорданов¹, Валентин Гюров²

¹Технически университет – Варна, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане”, докторант

²Технически университет – Варна, кат. „Електроснабдяване и електрообзавеждане”

PHYSICAL MODEL FOR SIMULATION OF FAULTS IN ELECTRICAL EQUIPMENT WITH ASYNCHRONOUS MOTORS WITH THE USE OF CURRENT SIGNATURE ANALYSIS

Yulian Yordanov¹, Valentin Gyurov²

¹ Technical University of Varna, Department of Electric Power Supply and Equipment, PhD Student

² Technical University of Varna, Department of Electric Power Supply and Equipment

Abstract

The study presents possibility for physical simulation of different types of faults in electrical equipment with belt drive induction motor. The primary task of research is construction and simulation of physical model for detection of distinct faults in the induction motor with the use of current signature analysis. An opportunity for research across the entire operating range was demonstrated.

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

ВЪВЕДЕНИЕ

В диагностиката на електрически машини по време и преди въвеждане в експлоатация, важно място заема методът, използващ спектрален анализ на статорния ток (MCSA). Усъвършенстването и широкото разпространение на тази методика, естествено доведе до синтезирането на основни принципи и добри практики в стандарт ISO 20958:2013 [1, 2]. Основавайки се на препоръките, дадени в стандарта, настоящото изследване цели приложение на MCSA за създаване на стенд за симулиране и изследване на дефекти на асинхронните електрозадвижвания в условия, близки до реалните. Представеният подход дава възможност за експериментални изследвания за установяване на взаимовръзките между отделни характерни повреди, тяхната проява в спектралния анализ и количествената им оценка.

ИЗЛОЖЕНИЕ

Голямото разнообразие от промишлени агрегати с асинхронни електрозадвижвания, използващи различни видове предавателни механизми, дават основание да се изследват по-подробно взаимното им влияние и признаците за възможни повреди. Разработеният стенд за изследване е проектиран така, че да може да се симулират и изследват ремъчни асинхронни електрозадвижвания, които са широко разпространени в практиката. Създадена е допълнителна възможност за регулиране на скоростта, както и за изследване на асинхронен електродвигател за вертикален монтаж. При вертикално монтираните електродвигатели силата на тежестта на ротора, която действа на лагерните опори се различава по направление, в сравнение с тези, действащи при

машины с хоризонтален монтаж. В зависимост от куплирането на задвижвания механизъм и електродвигателя съществуват също известни разлики в направлението на действащите сили, в случая с ремъчна предавка задвижващият вал е натоварен основно в радиално направление. Посочените специфични особености послужиха като насоки при реализация на подобен стенд за симулация и изследване на основни видове дефекти в ремъчните електрозадвижвания. Целта е да се покаже възможността за подобни изследвания на механизми с конструкция, максимално близка до тази производствените агрегати. Конструктивните особености и конфигурация на предложенния стенд осигуряват повечето условия, които влияят при работата на такива електрозадвижвания. По тези причини физическа симулация от този тип би трябвало да внесе още по-голяма яснота и нови знания, в практическата диагностика кои дефекти надеждно могат да бъдат открити чрез спектрален анализ на статорния ток.

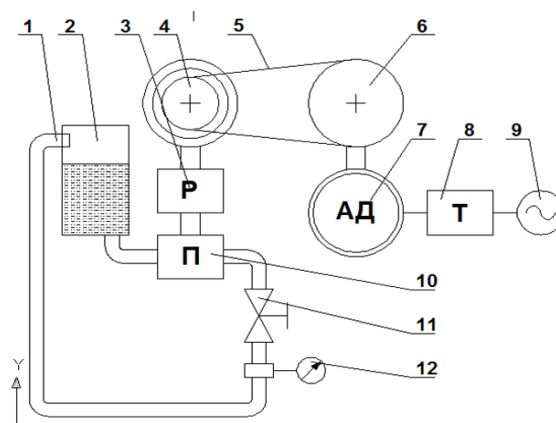
1. Принципна схема

Принципна схема на стенда е показана на Фигура 1.

Основни възли на стенда са:

- 1) тръби на хидравличната система;
- 2) съд разширителен;
- 3) редуктор;
- 4) шайба ремъчна степенчата;
- 5) ремък
- 6) шайба ремъчна степенчата;
- 7) двигател асинхронен;
- 8) табло защита, честотно управление;
- 9) захранваща мрежа;
- 10) помпа зъбна;
- 11) кран шибърен;
- 12) манометър.

За извършване на експериментални изследвания в широк диапазон на натоварването с плавно регулирано е избрано използването на хидравлична система с дроселиране при използването на зъбна циркуляционна помпа.



Фиг.1. Стенд за симулация

Този режим на работа е недопустим при нормалната експлоатацията на зъбните помпи, поради стръмните им дебит-напорни ($Q-H$) характеристики, но именно тази особеност, съчетана с електрически и хидравлични защиты, позволява създаването на функционално товарно устройство с линейни товарни характеристики за целия диапазон на регулиране при минимални инвестиции.

Във връзка с осигуряване на необходимата коравина на структурата, което е свързано с достоверността на резултатите, както и за създаване на условия, близки до реалните, е използвана конструкцията на колонна бормашина. За извършване на различни диагностични изследвания и симулации са използвани асинхронни двигатели със следните параметри 2.2 kW , 1500 min^{-1} с идентични, гарантирани каталожни данни, с присъединителни размери и вид монтаж спрямо наличния фундамент – 2 бр. (един експериментален и един за сравнение).

Изглед на силовото табло с прилежащото му комутационно, защитно и измервателно оборудване е показан на Фигура 2.

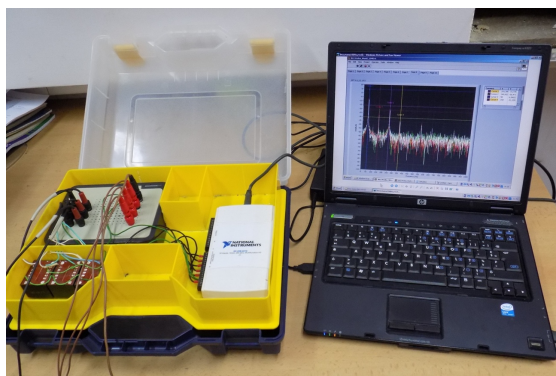
2. Измервателна система

Използваната система за диагностика е изградена на база 16-канално DAQ устройство с честота на семплиране 250 kS/s на National Instruments тип USB 6210 [2]. За събиране, обработка, анализ и систематизиране на получените данни е използвана графичната платформа LabView, която дава широки възможности за визуализация и бързо конфигуриране.

На Фигура 3 е представен изглед на използваната система.



Фиг.2. Изглед от табло управление на физическия модел



Фиг. 3. Система за измерване и обработка на данни

3. Експериментална постановка

С цел получаване на добра достоверност, точност и съпоставимост на получените резултати са използвани препоръките на стандарт ISO 20958 [1, 4, 5]. За оценка на получения ексцентрицитет се препоръчва измерване на следните специфични честотни компоненти:

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

където: f_{ec} – честотни компоненти, резултат от ексцентритета на въздушната междина [Hz]; f_1 – честотата на захранващата мрежа [Hz]; R_s – брой роторни канали; η_{ws} – 1, 3, 5...; s – хлъзгане; p – брой двойки полюси.

Формула 1 съдържа две части. Първата част, дадена като формула (2), ни дава основните честоти на проява на ексцентритет [1, 5, 6].

$$f_{ec} = f_1 \left(R_s \frac{1-s}{p} \pm \eta_{ws} \right) \quad (2)$$

Втората част на формула (1) ни дава симетричните честотни компоненти около основната честота [1, 4, 5], като се изчисляват с (3):

$$f_{sb} = \pm f_1 \left(\frac{1-s}{p} \right) \quad (3)$$

Друга препоръка за оценка на ексцентритета е оценка на динамичния ексцентритет, предизвикан от различни механични причини като несъосност, дебаланс и повреди в лагерните възли [1, 4]. Тези специфични компоненти се намират чрез (4):

$$f_e = f_1 \pm m \cdot f_r \quad (4)$$

където: f_1 – честота на захранващата мрежа [Hz]; f_r – честота на въртене на ротора [Hz]; m – 1, 3, 5...; f_e – честотен компонент, дължащ се на промените във въздушната междина.

Друг основен дефект, симулиран със стенда, е дебаланс на ремъчната шайба на асинхронния двигател. Характерните за тази повреда честотни компоненти се получават от формули (5) и (6):

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

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

където: f_{un} – характерна честота при поява при наличие на дебаланс [Hz]; f_r – честота на въртене [Hz]; z_r – брой роторни канали; f_{sb} – странични честотни компоненти; f_{st} – честота на захранващата мрежа.

Честота на въртене на ремъка също може да внесе колебания и се изчислява съгласно (7):

$$f_{belt} = f_r \left(\frac{\pi D_1}{l_{belt}} \right) \quad (7)$$

където: f_{belt} – честота на въртене на ремъка; f_r – честота на въртене на електродвигателя; D_1 – диаметър на водещата ремъчна шайба; l_{belt} – дължина на ремъка по вътрешния диаметър.

Ремъчните честоти често излизат в спектъра симетрично на честотните компонен-

ти, указващи наличието на динамичен дебаланс.

При симулацията е използван асинхронен електродвигател тип K100L-4 със следните данни:

- Номинална мощност 2.20 kW/3.00 HP;
- Синхронна скорост 1420 min^{-1} ;
- Схема на свързване 230- Δ /400-Y;
- Честота 50 Hz;
- Степен на защита IP 55;
- Ток при пълно натоварване (400 V) 4.78 A/8.28 A;
- Ток на празен ход 2.480 A;
- Клас на изолация F;
- Номинален фактор на мощността PF0.82;
- Клас на ефективност FL 81.10;
- Пусков ток 6.6 A;
- Преден лагер 6206ZZC3;
- Заден лагер 6206ZZC3.

Използваната тежест за симулиране на дефекта дебаланс е 30 г. Допълнителната маса е закрепена чрез специално устройство на степенчатата ремъчна шайба на електродвигателя, която е предварително балансиран самостоятелен детайл. За нуждите на конкретния експеримент не е нужна физическа повреда на двигателя, т.е. след експеримента ще е напълно работоспособен и без изменения в характеристиките си. В Таблица 1 са представени изчислените стойности на характерните честоти за ексцентритет, изчислени по 1, 2 и 3 за различни стойности на η_{ws} . Важна особеност на стенда е възможността за плавно натоварване на електродвигателя от празен ход до номинален товар при различни скорости, които се осигуряват чрез честотно управление, степенчати ремъчни шайби и редуктор с няколко различни предавки. Стендът за симулация е добре осигурен с електрически и механични защити на електрозадвижването, които предпазват от грешни манипулации и аварийни режими.

В съответствие с (4) са изчислени специфичните честоти за динамичен ексцентритет, които са представени в Таблица 2, съвместно с тях са представени компонентите характерни за дебаланс, честотата на въртене на електродвигателя и ремъчната честота.

При тази симулация използваната система за мониторинг е с честотна разделителна способност 0.4 Hz. Системата позволява много по-висока точност в благодарение на високата честота на семплиране едновременно по всички канали, което може да бъде използвано при диагностициране на дефекти като дефекти в ротора.

Табл. 1

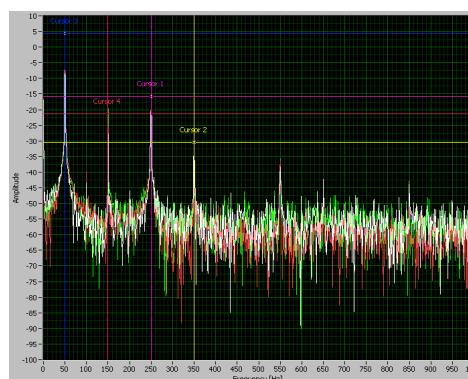
Честота, Hz	$\eta_{ws}=1$	$\eta_{ws}=3$	$\eta_{ws}=3$
f_{ec1}	712.9	812.9	912.9
f_{sb11}	736.6	836.6	936.6
f_{sb12}	689.2	789.2	889.2
f_{ec2}	612.9	512.9	412.9
f_{sb21}	589.2	489.2	389.2
f_{sb22}	636.6	536.6	436.6

Табл. 2

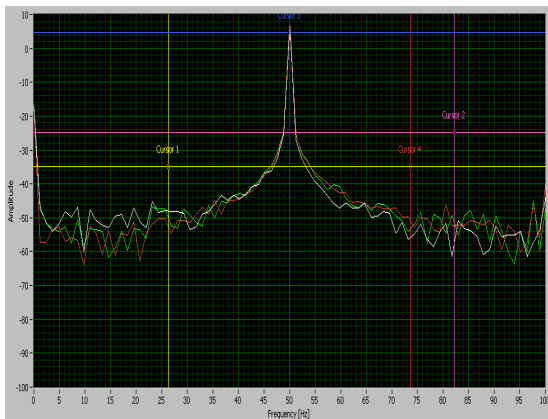
Честота, Hz	
fe1	73.7
fe2	26.3
fun	662.7
fsb1	712.7
fsb2	612.7
fr	23.67
fbelt	7.96

На Фигура 4 е представен FFT спектър при изпитване на празен ход (само двигател без товар), без да е добавена допълнителна маса на шайбата на електродвигателя за симулиране на дебаланс. В хармоничния състав на тока се отличават каноничните хармоници 3-ти, 5-ти и 7-ми, които са в резултат на особеностите на захранващата мрежа. На Фигура 5 е представен FFT спектър 0-100 Hz празен ход, без допълнителна маса.

Двата спектъра са снети едновременно. Разделени са в два диапазона за по-добра нагледност.



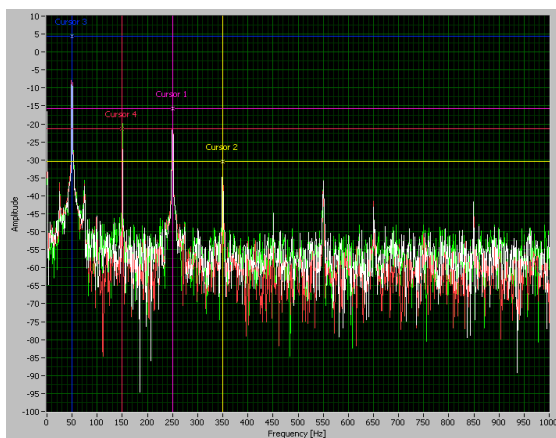
Фиг. 4. Опит на празен ход без тежест, мащаб 0-1 kHz



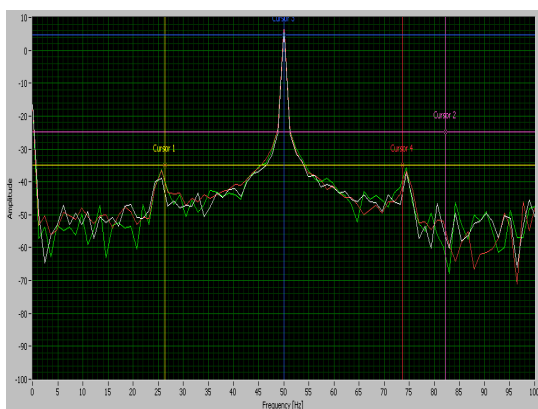
Фиг. 5. *Опит на празен ход без тежест, мащаб 0-100 Hz*

Вижда се ясно изявен първи хармоник на мрежова честота и липса на други съществени пикове. Може да се направи извод, че началното състояние е без признаци на търсените дефекти.

При симулация на дебаланс с допълнителна маса, без ремъчна предавка в спектъра на тока в диапазона до 100 Hz (Фигура 7) се отличават два пика на честоти близки до изчислените за динамичен ексцентритет.

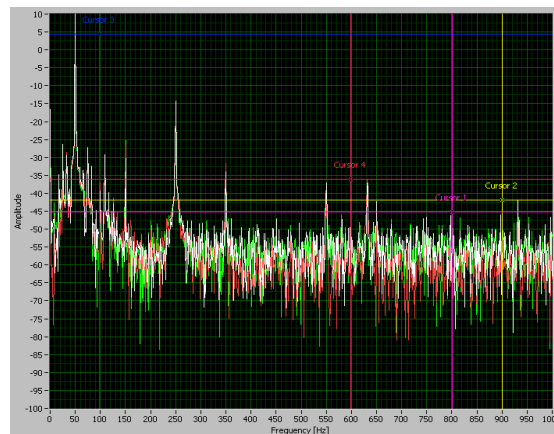


Фиг. 6. *Опит на празен ход с тежест, мащаб 0-1 kHz*



Фиг. 7. *Опит на празен ход с тежест, мащаб 0-100 Hz*

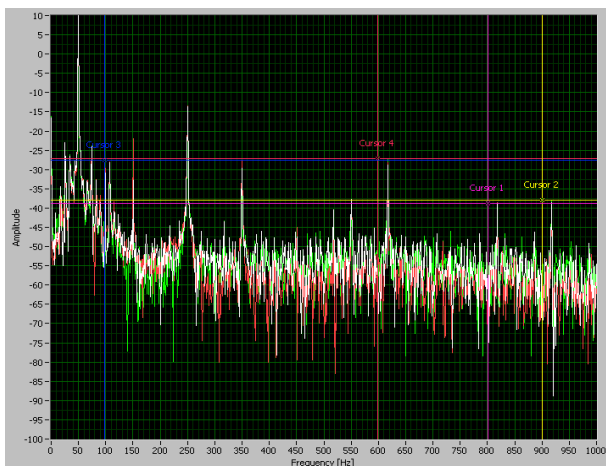
Други съществени промени в този спектър и в спектъра 0-1000 Hz не се наблюдават. Съществени промени се наблюдават и в спектъра 0-1000 Hz (Фигура 8), проявяват се честотите 636 Hz и 936 Hz, виждат се също и пиковете, събрани около 50 Hz, които липсват без товар и без тежест. В диапазона 0-100 Hz (Фигура 9) при опит с допълнителна тежест за дебаланс при товар 75%In, освен честотите, свързани с ексцентритет, се появяват и ремъчни честоти симетрично на основната и на тези, показващи динамичен ексцентритет. Може да се твърди че е налична взаимовръзка между изменението на честотите, характеризирани ексцентритет и допълнителни смущения от ремъчната предавка. От показаните на Фигура 11, най-съществени промени в спектъра настъпват при номинален товар с добавена допълнителна маса на водещата ремъчна шайба. В спектъра 0-100 Hz при пълно натоварване 100% In отново са ясно изразени пиковете за динамичен ексцентритет и ремъчни честоти.



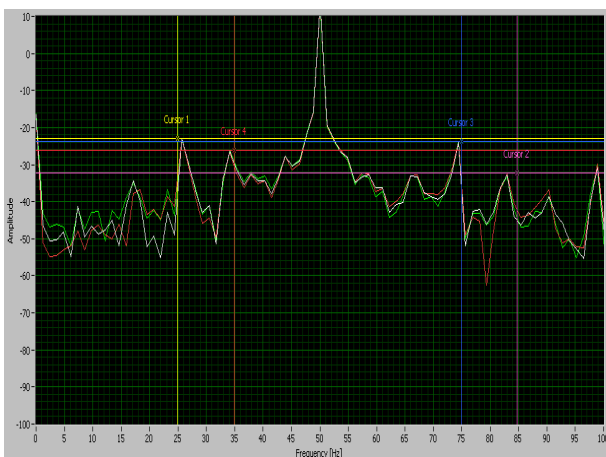
Фиг. 8. *Опит с тежест, 75% In, мащаб 0-1 kHz*



Фиг. 9. *Опит с тежест, 75% In, мащаб 0-100 Hz*



Фиг.10. Опит с тежест, I_n , мащаб 0-1000 Hz



Фиг.11. Опит с тежест, I_n , мащаб 0-100 Hz

В спектъра 0-100 Hz при пълно натоварване 100% I_n отново са ясно изразени пиковете за динамичен ексцентритет и ремъчни честоти. В спектъра 0-1000 Hz се наблюдават силни пикове на честоти 512 Hz, 612 Hz, 812 Hz и 912 Hz, които съответстват едновременно на признаците за статичен и динамичен ексцентритет.

Признаци на дебаланс в чист вид, изчислени по (2) и (3) не се откриват в анализирания по-горе спектри. Липсата на изяви пикове на тези честотни компоненти на статорния ток се дължи на спецификата на агрегата. Появата на характерни честоти за комбинация от дефекти, като: дебаланс; несъосност – ъглова и паралелна, ексцентритет – динамичен и статичен, могат да бъдат обяснени с ремъчната предавка на електроздвижването. Тоест съществува съвкупността от реални условия, с които се

сблъскват ежедневно специалистите по диагностика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С физическата симулация се доказва работоспособността на стенда и качеството на използваната измервателна система, която е неразделна част от него. С реализацията на този стенд се цели да се даде възможност при следващи експерименти да могат да се симулират характерните дефекти в асинхронните задвижвания с ремъчни предавки в пълен обем и с голяма точност. При подходящо мащабиране предложеният физически модел може да бъде използван за изпитване и симулации с различни габаритни типоразмери асинхронни двигатели за симулации на вентилаторни, компресорни и други агрегати с ремъчни предавки.

REFERENCE

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