

# Сравнительное исследование передовых методов диагностики асинхронных двигателей

Абдеррахим Аллал<sup>1</sup>, Абдеррахман Хечехуш<sup>1,2</sup>, Зиед Дрисс<sup>2</sup>

1 Технологический факультет, Университет Эль-Уэд, Алжир

2 Лаборатория электромеханических систем (LASEM), ENIS, Университет Сфакса, Тунис

**Аннотация.** Эта работа представляет собой сравнительное исследование различных передовых технологий диагностики асинхронных двигателей, опубликованных в последнее время, и классификацию этих методов диагностики в соответствии с их чувствительностью на основе экспериментальных результатов короткого замыкания статора между витками статора. Используя логарифмический спектр БПФ, исследователи открывают наилучший метод обнаружения неисправностей на их ранних стадиях, чтобы можно было прогнозировать их неисправности и предвидеть сбои, которые могут быть опасны для людей или экономики.

*Ключевые слова:* асинхронный двигатель; спектральный анализ; неисправность статора; диагностика; короткое замыкание

## 1. Введение

Достоинства асинхронных электродвигателей заключаются в том, что они иногда могут вызывать различные типы дефектов в статоре и роторе, вызывающие преждевременное старение. Поиск сигнатур или индикаторов этих неисправностей направлен на то, чтобы охарактеризовать работу машины путем определения типа и происхождения каждой из неисправностей; это позволяет обеспечить хорошее распознавание неисправностей или аномалий, возникающих на разных уровнях машины [1]. Для обнаружения различных неисправностей и их диагностики необходимо знать, влияет ли неисправность на нашу систему, используя датчики, подключенные непосредственно к фазам питания, и принимая сигналы в режиме реального времени, чтобы обработать их и определить состояние нашей машины [3]. По мнению специалистов по диагностике машин, важно не только обнаружить неисправность, но и определить ее местонахождение и определить ее источник [4, 5]. Несколько методов диагностики неисправностей в асинхронных двигателях опубликованы и предложены исследователями в журналах, курируемых диагностическими лабораториями. Они предложили классический метод, основанный на сигнатурном анализе тока двигателя асинхронных двигателей

(MCSA), который представляет собой онлайн-диагностическую систему с различными передовыми алгоритмами обработки сигналов. За последние десятилетия была проделана большая работа по поиску наилучшего диагностического метода [6, 7]. В другом исследовании был предложен более продвинутый метод обработки сигналов, основанный на преобразовании Парка-Гильберта (PVSMP-H). Эта группа исследователей использовала "Парковый модуль квадрата вектора" (PVSM) и линейный ток для получения "анализа сигнатуры квадратного тока двигателя" (MSCSA) [8-11]. Исследователи изобрели "метод векторного произведения Парка (PVPA) для диагностики асинхронных двигателей", который основан на улучшенной комбинации преобразования Гильберта и Парка [12-18]. Другой очень продвинутый метод называется "Метод векторного произведения Гильберта Парка" (HPVPA), который был вдохновлен их предыдущей техникой. Мы проведем исследование, чтобы провести сравнение между различными передовыми технологиями и классифицировать эти методы диагностики в соответствии с их чувствительностью, используя экспериментальные результаты короткого замыкания статора между его витками. Используя логарифмический спектр БПФ, мы можем найти наилучший метод выявления неисправностей на ранних стадиях, чтобы иметь возможность прогнозировать их и предвидеть поломки, которые могут быть опасны для людей или экономики.

## **2. Материалы и методы**

### **2.1. Описание инструмента извлечения сигналов**

Различные неисправности, которые влияют на MAS, будут оказывать влияние на сигналы, поступающие от этого ME, путем модуляции их амплитуд на характерных частотах этих неисправностей. Необходимо позаботиться о том, чтобы с очень удовлетворительным разрешением были четко видны различные дополнительные линии боковых полос, чтобы можно было легко анализировать и проводить диагностику нашей машины. В качестве примера мы собираемся провести испытания на нашем экспериментальном стенде, который имеет MAS с двумя сломанными стержнями при полной нагрузке, а затем при низкой нагрузке. Для этого мы выберем частоту дискретизации:  $F_e = 1000$  Гц, время сбора  $T_a \approx 10$  с, что подразумевает, что общее количество выборок ( $N_e = F_e * T_a$ ): следовательно, разрешение наших результатов равно  $\Delta f = F_e / N_e = 0,1$  Гц.

### **2.2. Параметр и рабочая скорость используемого двигателя**

Двигатель, используемый в электротехнической лаборатории Университета Бискара, трехфазный, 3 кВт, 50 Гц, 2 полюса, короткозамкнутый ротор с 28

стержнями на роторе и 360 витками последовательно на фазу, как показано в таблице 1.

Таблица 1. Параметры двигателя

Обозначения	Параметры	Значения
$V_n$	Номинальное напряжение	230/380 В
$I_n$	Номинальный ток	6,40 А
$\omega_n$	Номинальный ток	1430 тр/мин
$N_r$	Количество стержней ротора	28
$p$	Количество пар полюсов	2
$f_s$	Частота питания	50 Гц

Рис.1 - Рис.10, показывают эволюцию сигнатур, их амплитуд и конкретных частот различных методов в зависимости от состояния двигателя, где:

1) - Неисправность статора: - короткое замыкание между 4 витками обмотки статора.

2) - Двигатель в разных условиях эксплуатации:

- при малой нагрузке (25 %) при скольжении  $s = 0,014$ .

- при полной нагрузке (100 %) при скольжении  $s = 0,034$ .

### 3. Результаты

Чтобы показать чувствительность новых подходов или методов по сравнению с другими техниками, мы провели сравнительное исследование между различными подходами, чтобы узнать, какой подход обладает наилучшей чувствительностью. Различные методы представлены на рис. 1 – рис. 10.

Чтобы провести хорошее сравнение между этими подходами, мы также должны выбрать конкретные частоты сигнатур с наибольшей амплитудой. Частоты характерных признаков неисправностей статора приведены в таблице 2 ниже:

Таблица 2. Частотная характеристика неисправностей

Методы	Ошибка статора Короткое замыкание между витками
PVPA (2016)	$2f_s \pm f_{ra}$
HPVPA (2019)	$f_r$
PVSM <sub>p-h</sub> (2010)	$f_r$
MSCSA (2013)	$2f_s \pm f_{ra}$
MCSA	$f_s \pm f_{ra}$

а: берем сигнатуру с наибольшей амплитудой (с + или -)

Рис. 1 и рис. 2 представляют нам спектр MCSA и позволяют увидеть конкретные частоты сигнатур для каждого типа дефекта, приведенные в теоретической части настоящей работы, что подтверждает правильность математических уравнений.

Согласно табл. 1 и рис. 1 частота сигнатуры MCSA, наибольшая амплитуда которой теоретически равна  $f_s \pm f_r$ .

\* При малой нагрузке скольжение составляет  $g = 0,014$ , частота которого имеет сигнатуру:  $f_{ccs} = 25,1$  Гц

- при 4-х короткозамкнутых витках статора: -65,13 дБ.

\* При полной нагрузке скольжение равно  $g = 0,034$ , частота равна:  $f_{ccs} = 9.25,1$  Гц, частота найдена по рис. 2:

- с 4-мя короткозамкнутыми витками статора: -68,99 дБ.

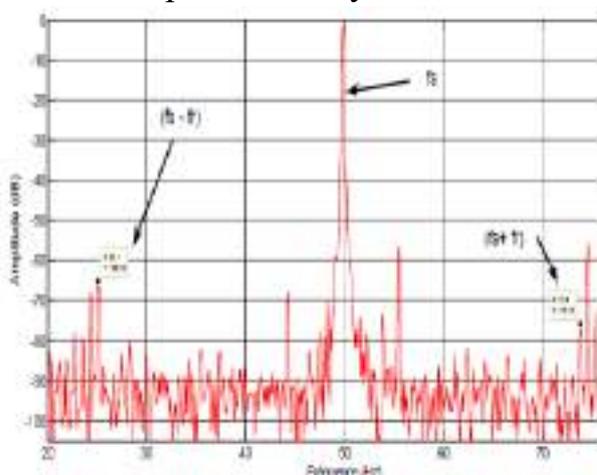


Рис. 1. Экспериментальный логарифмический спектр MCSA двигателя с 4-мя короткозамкнутыми витками статора при малой нагрузке

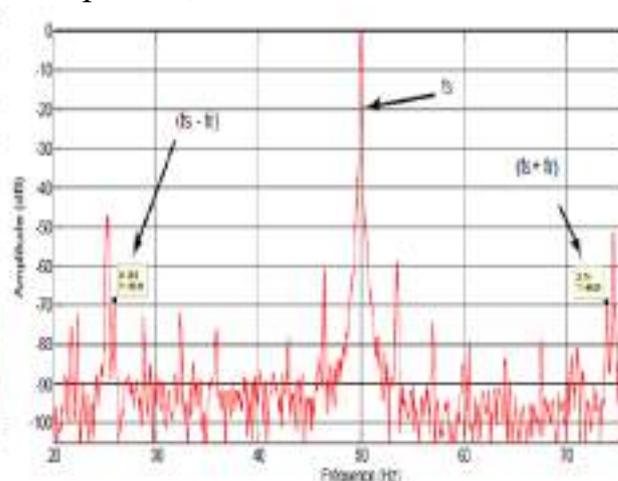


Рис. 2. Экспериментальный логарифмический спектр MCSA двигателя с 4-мя короткозамкнутыми витками статора при полной нагрузке

Согласно табл. 1, рис. 3 и рис. 4 частота сигнатуры MSCSA, наибольшая амплитуда которой теоретически равна  $2f_s \pm f_r$

\* При малой нагрузке скольжение составляет  $s = 0,014s$ , теоретическая частота:

$f_{ccs} = 124,5$  Гц, частота аналитического моделирования согласно рис. 3:

- с 4-мя короткозамкнутыми витками статора: -56,98 дБ.

\* При полной нагрузке скольжение равно расчетной теоретической частоте:

$f_{ccs} = 75,8$  Гц

- с 4-мя короткозамкнутыми витками статора: -67,49 дБ

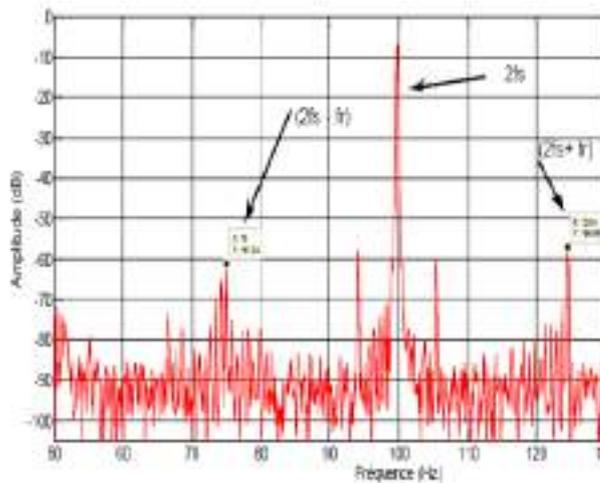


Рис. 3. Экспериментальный логарифмический спектр MSCSA двигателя с 4-мя короткозамкнутыми витками статора при малой нагрузке

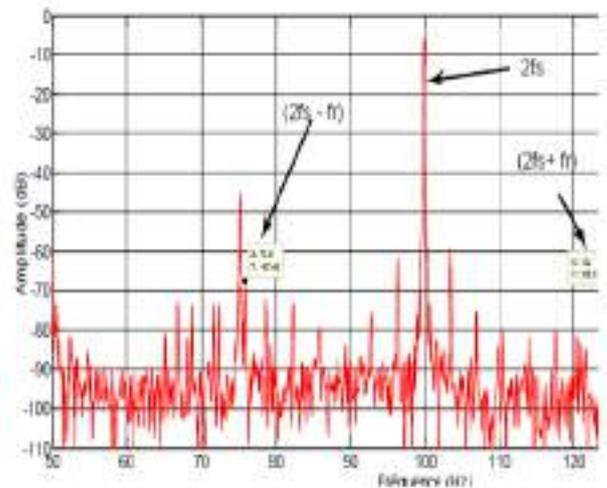


Рис. 4. Экспериментальный логарифмический спектр MSCSA двигателя с 4-мя короткозамкнутыми витками статора при полной нагрузке

Согласно табл. 1 на рис. 5 и рис. 6 частота сигнатуры PVPA, наибольшая амплитуда которой теоретически равна  $2f_s \pm f_r$

\* При малой нагрузке скольжение стоит в исправном состоянии  $s = 0,014s$ , теоретически рассчитанная частота:

$f_{ccs} = 124,5$  Гц, аналитическая частота моделирования согласно рис. 5:

- с 4-мя короткозамкнутыми витками статора: -45,86 дБ

\* При полной нагрузке  $s = 0,034s$ , расчетная частота:  $f_{ccs} = 75,8$  Гц,

- с 4-мя короткозамкнутыми витками статора: -60,49 дБ

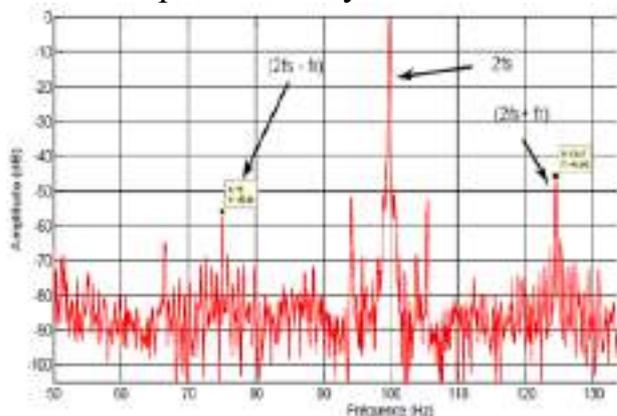


Рис. 5. Экспериментальный логарифмический спектр PVPA двигателя с 4-мя короткозамкнутыми витками статора при малой нагрузке

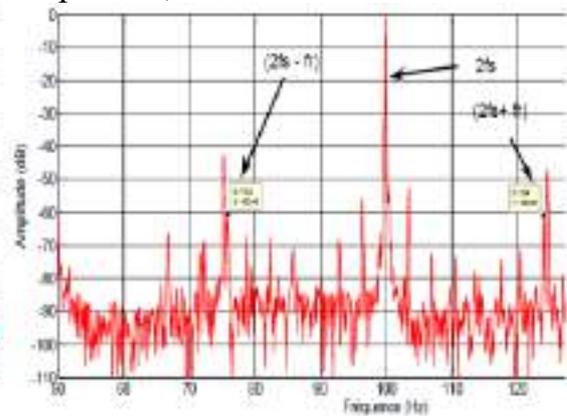


Рис. 6. Экспериментальный логарифмический спектр PVPA двигателя с 4-мя короткозамкнутыми витками статора при полной нагрузке

Из таб. 1 рис. 7 и рис. 8, частота сигнатуры PVSM<sub>p-n</sub>, наибольшая амплитуда которой теоретически равна  $f_r$   $f_{ccs} = 24,7$  Гц, частота аналитического моделирования по рис. 7:

\* При малой нагрузке  $s = 0,04s$  теоретически рассчитанная частота:

- с 4-мя короткозамкнутыми витками статора: -50,65 дБ

\* При полной нагрузке  $s = 0,034$  с, расчетная частота:  $f_{ccs} = 24,7$  Гц, частота моделирования по рис.8:

- с 4-мя короткозамкнутыми витками статора: -37,93 дБ

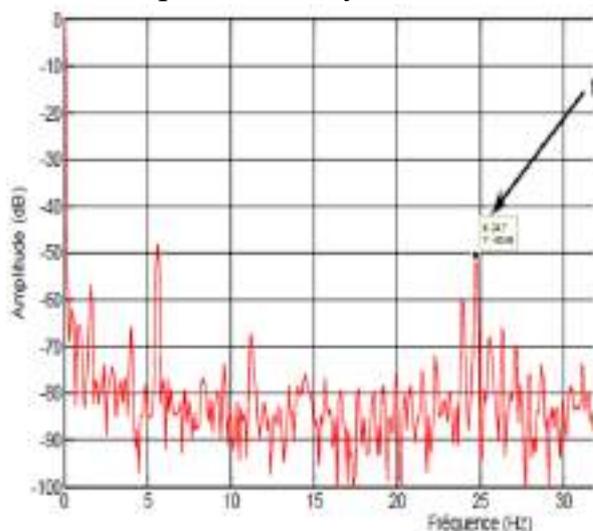


Рис. 7. Экспериментальный логарифмический спектр PVSMP–H двигателя с 4-мя короткозамкнутыми витками статора при малой нагрузке

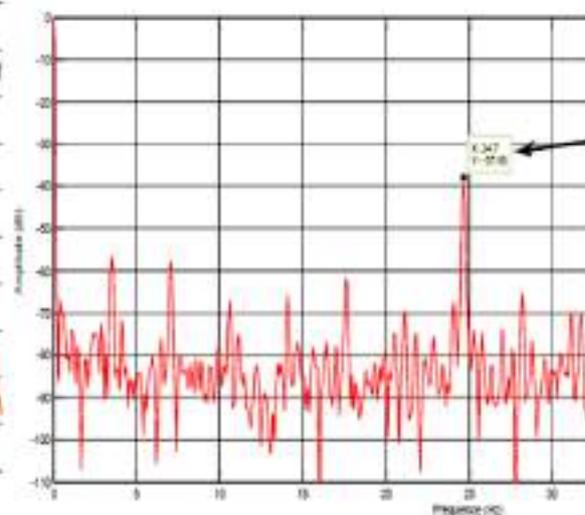


Рис. 8. Экспериментальный логарифмический спектр PVSMP–H двигателя с 4-мя короткозамкнутыми витками статора при полной нагрузке

Согласно таб.1, рис. 9 и рис. 10, частота сигнатуры HPVPA, наибольшая амплитуда которой теоретически равна  $f_r$ .

\* При малой нагрузке скольжение стоит в исправном состоянии  $s = 0,014$ , расчетная теоретическая частота сигнатуры:

$f_{ccs} = 24,7$  Гц, расчетная теоретическая частота сигнатуры по рис.9.

- с 4-мя короткозамкнутыми витками статора: -42,26 дБ.

\* При полной нагрузке и в исправном состоянии скольжение равно  $s = 0,034$ , теоретическая частота:

$f_{ccs} = 24,7$  Гц, частота моделирования найдена по рис.10:

- с 4-мя короткозамкнутыми витками статора: -46,01 дБ

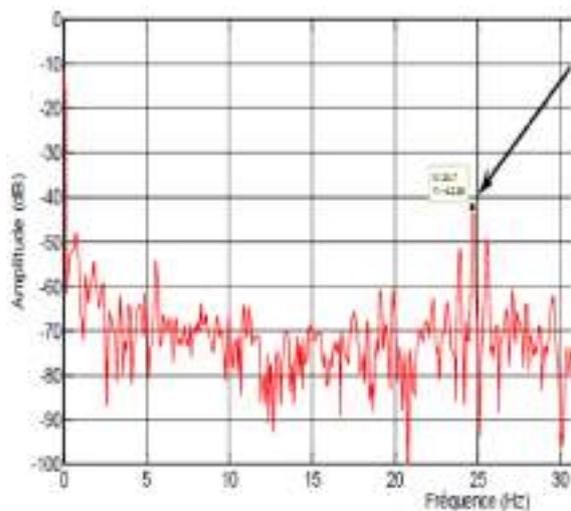


Рис. 9. Экспериментальный логарифмический спектр HPVPA двигателя с 4 короткозамкнутыми витками статора при малой нагрузке

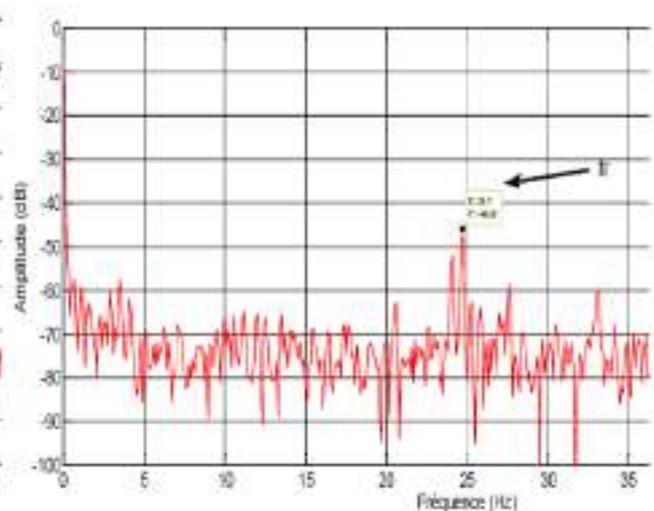


Рис. 10. Экспериментальный логарифмический спектр HPVPA двигателя с 4 короткозамкнутыми витками статора при полной нагрузке

#### 4. Обсуждение

После получения всех специфических сигнатур разных методов к различным дефектам асинхронных двигателей, выбрав сигнатуры, амплитуда которых является наибольшей, мы рисуем иллюстративные графики, которые показывают чувствительность каждого метода для каждого типа неисправности. Рис.11 наглядно демонстрирует нам сравнение различных техник, использованных ранее. Можно легко заметить, что кривая HPVPA классифицируется в первой позиции, относительно второй позиции, которая относится к чувствительности метода PVSM-P. На третьей и четвертой позициях мы находим PVPA и MSCSA, соответственно. В последней позиции находится классический метод MCSA. Эти результаты логичны из истории публикаций этих методик в научных журналах.

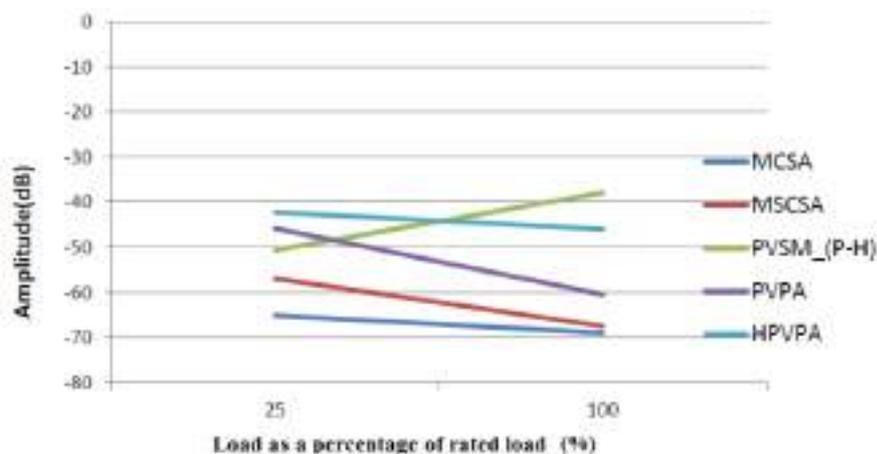


Рисунок 11. Кривые чувствительности различных передовых методов диагностики с 4-мя короткозамкнутыми витками статора

Таблица 3. Классификация диагностических методов в соответствии с их экспериментальной чувствительностью

Методы диагностики	Неисправность статора (с 4 короткозамкнутыми витками статора)		Рейтинг передовых методов диагностики
	Низкая нагрузка	Полная загрузка	
PVPA	2	3	3
MSCSA	4	4	4
MCSA	5	5	5
PVSMP-H	3	1	2
HPVPA	1	2	1

## 5. Выводы

Было выполнено сравнительное исследование передовых методов диагностики (PVPA, MSCSA, MCSA, HPVPA, PVSMP-H) для диагностики неисправностей статора (с 4 короткозамкнутыми витками статора) в двух рабочих состояниях, низкой нагрузке и полной нагрузке. Благодаря кривым чувствительности различных передовых методов диагностики с 4 короткозамкнутыми витками статора (экспериментальные результаты), где мы обнаружили, что метод HPVPA классифицирован на первой позиции, затем PVSMP-H на второй позиции, а методы PVPA и MSCSA заняли третью и четвертую позицию чувствительности, соответственно.

Наконец, мы получили уникальный метод HPVPA, чувствительность которого превосходит все другие современные методы, которые были классифицированы в соответствии с их чувствительностью: PVSMP-H, PVPA, MSCSA и MCSA. Исследования, связанные с асинхронными машинами, показали, что большой процент их неисправностей вызван неисправностями обмотки статора. Метод MCSA обладает низкой чувствительностью к неисправностям статора, поэтому он занимает пятую позицию.

Это сравнение позволило нам найти наилучший метод обнаружения неисправностей статора, обладающий превосходной чувствительностью для защиты систем. Мы можем найти наилучший метод обнаружения неисправностей на ранних стадиях, чтобы можно было прогнозировать их неисправности и предвидеть сбои, которые могут быть опасны для людей или экономики.

## Литература

[1] M. Blodt, P. Granjon, B. Raison, G. Rostaing,, “Models for bearing damage detection in induction motors using stator current monitoring”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 4, pp. 1813- 1822, 2008.

- [2] M. Boucherma, M. Y. Kaikaa, A. Khezzer, Park model of squirrel cage induction machine including space harmonics effect, *Journal of Electrical Engineering*, vol 157, No.4, pp. 193-199, 2006.
- [3] E. Lughofer, E. P. Klement, "Model-based fault detection in multi-sensor measurement systems, Technical report FIII/Tr/0303", Johannes Kepler University Linz, Austria.
- [4] S. Ben Salem, K. Bacha, A. Chaari, "Support vector machine-based decision for induction motor fault diagnosis using air-gap torque frequency response", *International Journal of Computer Applications*, vol 38, no.5, pp. 27-33, 2012.
- [5] S. Ben Salem, K. Bacha, A. Chaari, "Support vector machine based decision for mechanical fault condition monitoring in induction motor using an advanced Hilbert-Park transform", *ISA Trans.*, vol. 51, no.5, pp. 566–572, 2012.
- [6] T. Sribovornmongkol, "Evaluation of motor online diagnosis by FEM simulations", Thesis, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2006.
- [7] K. Bacha, S. Ben Salem, A. Chaari, "An improved combination of Hilbert and Park transforms for fault detection and identification in three-phase induction motors", *Electrical Power and Energy Systems*, vol 43, no.1, pp.1006–1016, 2012.
- [8] Mohamed Sahraoui, Adel Ghoggal, Salim Guedidi, Salah Eddine Zouzou, "Detection of inter-turn short-circuit in induction motors using Park–Hilbert method", *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, vol 5, no.3, pp. 337-351, 2014.
- [9] M. Sahraoui, "Etude comparative des méthodes de diagnostic des machines asynchrones (Comparative study of the methods of diagnosis in the asynchronous machines)", Thesis for the degree of Doctor of Science, Biskra university, Algeria, 2010.
- [10] V. F. Pires, M. Kadivonga, J. F. Martins, A.J. Pires, "Motor square current signature analysis for induction motor rotor diagnosis", *Measurement*, vol. 46, no.2, pp. 942–948, 2013.
- [11] A. Allal, B. Chetate, "High sensitivity detection of the stator short-circuit faults in induction motor using Hilbert Park's vector product", *J. Fundam. Appl. Sci.*, vol. 11, no. 2, pp. 994-1022, 2019.
- [12] M. Sahraoui, S. E. Zouzou, A. Ghoggal, S. Guedidi, "A new method to detect inter-turn short-circuit in induction motors, 19th ed., *International conference on Electrical Machine (ICEM,2010 -Rome, Italy)*, IEEE, pp. 1-6, 2010.
- [13] S. E. Zouzou, M. Sahraoui, A. Ghoggal, et al. "Detection of inter-turn short-circuit and broken rotor bars in induction motors using the partial relative indexes: application on the MCSA," 19th ed., *International conference on Electrical Machine (ICEM,2010)*, Sept 2010, (Rome,Italy), IEEE, p 1-6, 2010.
- [14] A. Allal, B. Chetate, D. Benattous, "The Instantaneous Power Approach for Rotor Cage Fault Diagnosis in Induction Motor," 6th symposium on Hydrocarbons and chemistry ISHC6, (Zeralda, Algiers), 2012.

- [15] I. Chouidira, K. Djalal Eddine, H. Benguesmia, "Detection and Diagnosis faults in Machine asynchronous based on single processing," *International Journal of Energetica (IJECA)*, vol. 4, no. 1, pp. 11–16, 2019.
- [16] A. Allal, B. Chetate , " A new and best approach for early detection of rotor and stator faults in induction motors coupled to variable loads", *Frontiers in Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 176-191, 2016.
- [17] A. Allal, "Nouvelles méthodes et techniques de diagnostic des machines asynchrones à rotor en cage d'écureuil (New methods and diagnostic techniques asynchronous machines of squirrel cage rotor)," Thesis for the degree of Doctor of Science, Boumerdes university, Algeria, 2017.
- [18] Abderrahim Allal, Abderrahmane Khechekhouche, Zied Driss, "Induction machines diagnosis by the time's harmonics", *International Journal of Energetica*, vol. 5, no. 2, pp. 32-36, 2020.