

**М.В. ЗАГИРНЯК**, д-р техн. наук, профессор, КрНУ

им. М. Остроградского, Кременчуг

**Ж.И. РОМАШИХИНА**, аспирант, КрНУ им. М. Остроградского,  
Кременчуг

**А.П. КАЛИНОВ**, канд. техн. наук, доцент, КрНУ

им. М. Остроградского, Кременчуг

## **ДИАГНОСТИКА ПОВРЕЖДЕНИЙ СТЕРЖНЕЙ РОТОРА В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА ЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Проведен анализ магнитного поля в воздушном зазоре асинхронного двигателя при наличии повреждений стержней ротора после отключения машины от сети с помощью метода конечных элементов. Предложено использовать вейвлет-анализ рассчитанного в результате моделирования сигнала электродвижущей силы в обмотках статора, что позволяет определять расположение поврежденных стержней ротора.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, метод конечных элементов, вейвлет-анализ.

**Введение.** Асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором являются наиболее распространенным видом электрических машин (ЭМ). Ежегодно выходит из строя около 20-25 % от общего количества АД. По статистике около 5 % отказов АД происходит из-за повреждений стержней ротора.

Существуют различные методы диагностики повреждений стержней ротора АД [1]. Большинство этих методов требуют выведения двигателя из рабочего процесса и его разборки. Существующие методы диагностики повреждений АД в рабочем режиме, например, методы спектрального анализа тока статора, не учитывают влияния питающей сети на результаты диагностики. При этом метод спектрального анализа тока статора не дает удовлетворительных результатов при проведении диагностики в режиме холостого хода. Кроме того, использование результатов быстрого преобразования Фурье сигналов тока не позволяет однозначно определить степень повреждения и взаимное расположение поврежденных стержней ротора.

Поэтому актуальной задачей является разработка методов, которые могут определять степень повреждения и место нахождения поврежденных стержней без вывода двигателя из технологического процесса. В последнее десятилетие в сфере диагностики АД активно используются численные методы исследования [2-3].

Как известно, математическое моделирование ЭМ с помощью классической теории поля позволяет исследовать их характеристики с использованием анализа упрощенных цепных моделей.

Численные методы анализа электромагнитного поля позволяют исследовать как установившиеся, так и динамические режимы работы ЭМ. Одним из наиболее распространенных численных методов анализа поля АД является метод конечных элементов (МКЭ).

При этом анализ установившихся режимов работы ЭМ выполняется по результатам расчета их электромагнитного поля. Анализ переходных и динамических режимов выполняется с помощью цепно-полевых математических моделей (ЦПММ). Они базируются на совместном решении дифференциальных уравнений электрических цепей обмоток и уравнений нестационарного электромагнитного поля в активной зоне ЭМ [4].

Известно, что повреждения стержней ротора приводят к искажению магнитного поля в зазоре АД. Наличие пазов на статоре и роторе АД обуславливает появление зубцовых пространственных гармоник этого поля. Зубцовые пульсации дают возможность сопоставления линий магнитного поля с геометрическим расположением зубцов.

В работе [5] для диагностики повреждений стержней ротора проводится анализ процессов в АД после его отключения от сети. Использование отключения АД позволяет избежать влияния некачественности напряжения питающей сети на результаты диагностики. После отключения двигателя от сети в обмотках статора наводится электродвижущая сила (ЭДС), обусловленная затуханием токов в обмотках вращающегося ротора. По анализу мгновенных значений ЭДС в обмотках статора фиксируются искажения магнитного поля, вызванные повреждениями стержней ротора.

При проведении экспериментальных исследований искажения магнитного поля могут быть вызваны, кроме повреждений стержней ротора, рядом других факторов: статического и динамического дисбаланса ротора, несимметрии магнитной системы и тому подобное. Поэтому для оценки влияния повреждений стержней ротора на магнитное поле АД предложено использовать математическую модель, базирующуюся на МКЭ [2-3].

**Цель работы.** Расчет магнитного поля асинхронного двигателя с использованием метода конечных элементов и анализ его результатов для диагностики повреждений стержней ротора по сигналу электродвижущей силы обмотки статора после отключения двигателя от сети.

**Теоретические основы.** Для расчета ЭДС, которая наводится в обмотках статора АД [4], используются потокоцепления этих обмоток.

Соотношение между магнитной индукцией  $\vec{B}$  и векторным магнитным потенциалом (ВМП)  $\vec{A}$  согласно уравнения Максвелла:

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A}. \quad (1)$$

Для расчета ЭДС в обмотках статора используется полное потокоцепление фазы обмотки:

$$\Psi_{\phi} = \frac{2l_1 w}{S_{\phi}} \int_{S_{\phi}} A_{z\Sigma} dS, \quad (2)$$

где  $l_1$  – активная длина статора,  $w$  – количество последовательно соединенных витков в пазу,  $S_n$  – площадь сечения паза статора,  $A_{z\Sigma}$  – суммарное арифметическое значение ВМП по всем пазам фазы,  $S_{\phi}$  – суммарная площадь поперечного сечения всех последовательно соединенных катушек фазы.

Значения потокоцепления используются для определения ЭДС фазы обмотки статора по закону электромагнитной индукции:

$$e_s(t) = -\frac{d\Psi_{\phi}}{dt}. \quad (3)$$

При расчете ЭДС обмоток статора после отключения АД от сети учитывается характер затухания токов в стержнях ротора. В момент отключения двигателя от сети ( $t = 0$ ) токи в фазах статора равны нулю. При этом соблюдается принцип постоянства потокоцеплений. Ток ротора в момент отключения АД от сети определяется выражением [6]:

$$I_{2i\dot{a}\dot{v}} = I_{2(t=0)} + k_2 I_{1(t=0)}, \quad (4)$$

где  $I_{2(t=0)}$  – ток ротора предыдущего установившегося режима в момент отключения АД от сети,  $k_2$  – коэффициент связи ротора [6],  $I_{1(t=0)}$  – ток статора предыдущего установившегося режима в момент отключения АД от сети.

В последующие моменты времени токи в стержнях ротора затухают по экспоненциальному закону с постоянной времени:

$$\tau = \frac{L_2}{R_2}, \quad (5)$$

где  $L_2$  – индуктивность ротора,  $R_2$  – активное сопротивление ротора.

**Численное моделирование.** Для исследований выбран АД типа АИР80В4У2 ( $P = 1,5$  кВт,  $n = 1395$  об/мин,  $\eta = 0,77$ ,  $\cos \varphi = 0,81$ ). Для численного расчета магнитного поля разработана модель АД, которая учитывает геометрию машины, магнитные и электрические свойства ее активных материалов.

Поверхностный эффект в двумерной постановке решения задачи магнитного поля в поперечном сечении учитывается введением граничных условий. Не учитывается скос пазов ротора. Обрыв стержня рассматривается как полное нарушение электрического контакта с короткозамыкающим кольцом ротора.

Расчет магнитного поля в поперечном сечении АД выполнен с помощью программы [7], которая позволяет решать как линейные, так и нелинейные задачи.

Для построения кривой ЭДС был проведен расчет магнитного поля АД для двух полных оборотов ротора с шагом поворота на 1 град. При этом учитывается снижение частоты вращения ротора после отключения двигателя от сети.

Расчет магнитного поля в поперечном сечении АД проведен в пакетном режиме с использованием LUA-скрипта. Набор команд, которыми определяется LUA-скрипт, может быть изменен в соответствии с задачами, которые поставлены при расчете. Полученная модель может быть использована для исследования АД любой мощности и различных динамических режимов работы, которые определяются только начальными значениями токов в пазах статора и ротора.

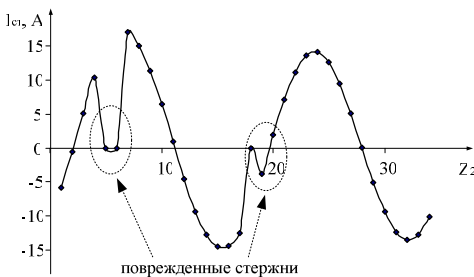


Рис. 1. Распределение токов в роторе АД с повреждениями трех стержней

Для определения токов в стержнях ротора в момент отключения двигателя от сети разработана цепная модель АД, в которой количество электрических контуров ротора соответствует количеству стержней [8].

Повреждение стержня смоделировано путем разрыва цепи в поврежденном контуре. При этом распре-

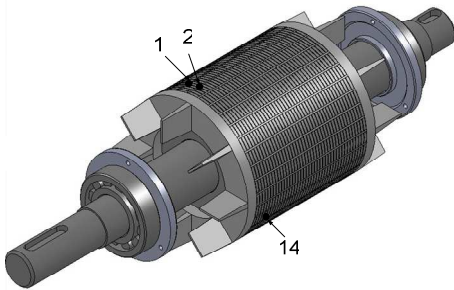


Рис. 2. Расположение поврежденных стержней на роторе АД

деление токов в стержнях неповрежденного ротора имеет вид синусоиды. При наличии повреждения ток в поврежденном стержне равен нулю, а в остальных стержнях ротора происходит перераспределение токов. Распределение токов в стержнях ротора с повреждениями трех стержней представлено на рис. 1.

Выбор номеров и расположения поврежденных стержней осуществлен в привязке к физическому исследуемому АД с искусственно внесенными повреждениями ротора. Нарушение электрической связи между стержнями выполнено с помощью высверливания отверстий в роторе (на рис. 2 они обозначены под номерами 1, 2 и 14).

Разработанная цепная математическая модель позволяет исследовать режимы работы АД с различным числом поврежденных стержней с учетом геометрического расположения повреждения. Результаты моделирования позволили получить значения токов в стержнях ротора в начальный момент отключения АД от сети. Эти значения были использованы при расчете магнитного поля АД МКЭ в режиме отключения.

В результате расчета магнитного поля после отключения АД от сети получено распределение линий магнитного потока для неповрежденного двигателя (рис. 3, а) и с повреждениями стержней ротора (рис. 3, б). Поврежденные стержни отмечены черным цветом.

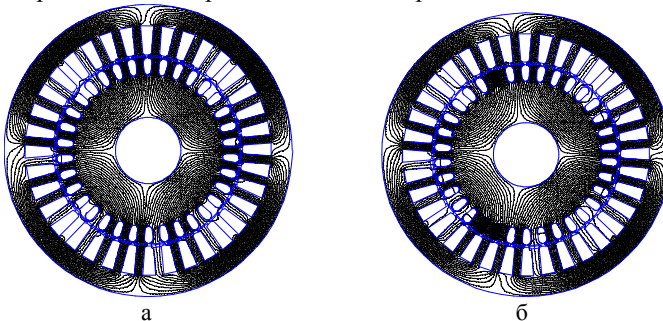


Рис. 3. Линии магнитного потока неповрежденного АД (а) и АД с повреждениями трех стержней ротора (б)

Как показывают результаты моделирования, в неповрежденном двигателе наблюдается симметричное распределение линий магнитного поля. При наличии поврежденных стержней ротора магнитное поле становится несимметричным.

Для определения диагностических критериев выполнен анализ распределения магнитного поля АД в динамическом режиме. Для оценки искажений магнитного поля используется сигнал ЭДС в обмотках статора, рассчитанный на основании выражения (3) для двух полных оборотов ротора после отключения АД от сети.

На рис. 4 показаны кривые сигналов ЭДС в обмотках статора неповрежденного АД, а также АД с повреждениями одного и трех стержней, соответственно.

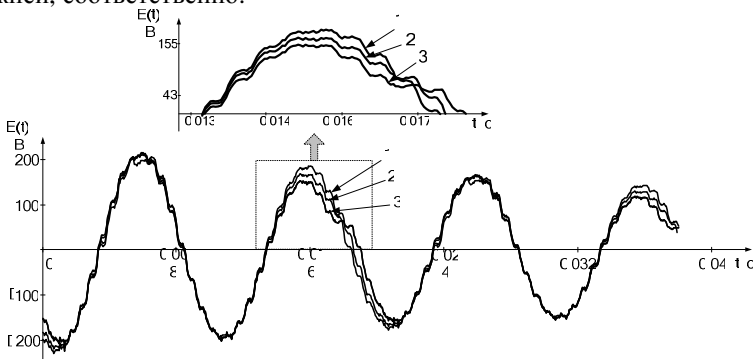


Рис. 4. Сигналы ЭДС в обмотках статора: 1 – неповрежденного АД, 2 – АД с повреждением одного стержня ротора, 3 – АД с повреждениями трех стержней ротора

Как показывают результаты расчета ЭДС в обмотках статора, из-за увеличения эквивалентного сопротивления клетки ротора амплитуда ЭДС уменьшается.

С увеличением числа поврежденных стержней на сигнале ЭДС видны некоторые искажения. Для оценки влияния повреждений стержней ротора выполнено сравнение полупериодов расчетных и аппроксимированных сигналов ЭДС в обмотках статора неповрежденного АД и АД с повреждениями (рис. 5).

Результаты сравнения показывают, что в неповрежденном АД ЭДС в обмотках статора имеет форму правильной синусоиды, модулированной высокочастотными колебаниями, которые обусловлены зубчатой конструкцией АД. При наличии повреждений в сигнале ЭДС наблюдается явное отклонение формы сигнала от синусоидальной.

Для оценки искажений на сигнале ЭДС предложено использовать вейвлет-анализ [7].

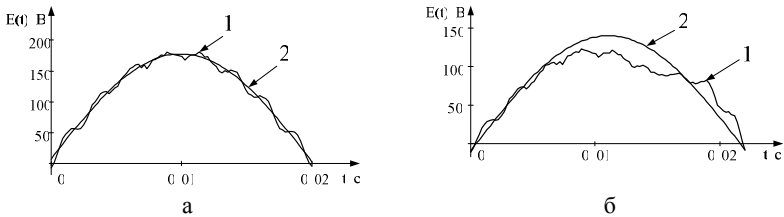


Рис. 5. Фрагменты расчетного (1) и аппроксимированного (2) сигналов ЭДС в обмотках статора неповрежденного АД (а) и АД с повреждениями трех стержней ротора (б)

Вейвлет-преобразование является обобщением спектрального анализа, однако благодаря возможности анализа, как в частотной, так и во временной областях, позволяет выполнять анализ и обработку сигналов и функций, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве.

Были проведены исследования по выбору вейвлет-функций для вейвлет-преобразования рассчитанного сигнала ЭДС в обмотках статора. В ходе исследований установлено, что для анализа колебательных сигналов, имеющих вид синусоиды, можно использовать ортогональные вейвлеты с компактным носителем. К этим вейвлетам относятся вейвлеты Добеши, Симлета и Коифлетса [9].

Как показывают результаты исследований, на низких частотах в спектре отображается только затухающий характер сигнала. Для выявления локальных особенностей сигнала ЭДС в обмотках статора выполнен вейвлет-анализ вейвлетом Симлета третьего порядка.

На рис. 6 представлены результаты вейвлет-преобразования ЭДС в обмотках статора неповрежденного АД и АД с повреждениями одного и трех стержней ротора, соответственно.

На вейвлет-спектре сигнала ЭДС (рис. 6, а) в области высоких частот видны зубцовые гармоники, количество которых соответствует реальному числу стержней ротора. Анализ вейвлет-спектров на рис. 6,б и 6,в, показывает, что явно выраженные коэффициенты вейвлет-разложения, выделенные пунктиром, соответствуют поврежденным стержням.

Для оценки влияния повреждения ротора предложено использовать анализ значений коэффициентов вейвлет-разложения, характерных для области средних частот, на которых проявляются повреждения стержней.

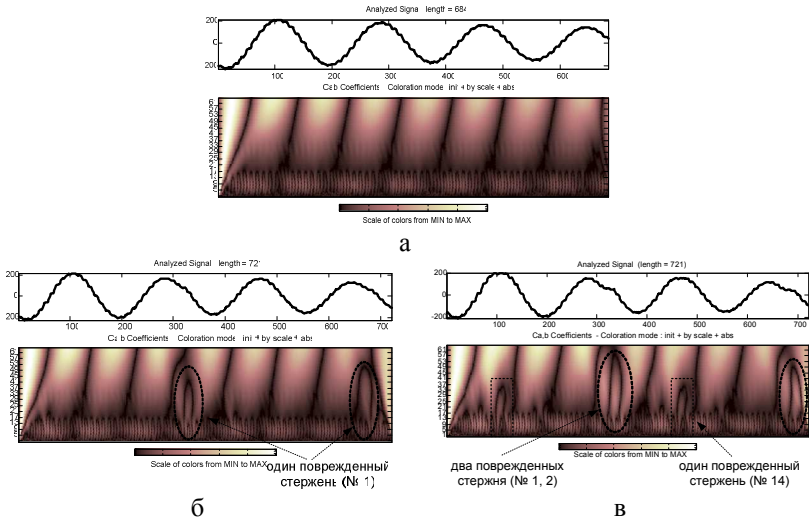


Рис. 6. Сигналы ЭДС в обмотках статора и их вейвлет-спектры для неповрежденного АД (а) и АД с повреждением одного (б) и трех (в) стержней ротора

Было предложено использовать коэффициент, представляющий собой среднее значение суммы коэффициентов вейвлет-разложения для области средних частот, который определяется выражением:

$$K = \frac{\sum_a^A k_a}{n}, \quad (6)$$

где  $k_a$  – значения коэффициентов вейвлет-разложения на выбранном масштабе,  $a$  и  $A$  – начальное и конечное значения масштаба вейвлет-спектра соответственно,  $n$  – количество коэффициентов вейвлет-разложения на выбранном масштабе.

Значения масштаба вейвлет-спектра при построении коэффициентов вейвлет-разложения были приняты в диапазоне  $a = 18..32$  при максимальном значении масштабного коэффициента  $a_{max} = 64$ .

В соответствии с выражением (6) были построены коэффициенты вейвлет-разложения  $K$  для неповрежденного АД и АД с повреждением одного и трех стержней ротора, соответственно (рис. 7).



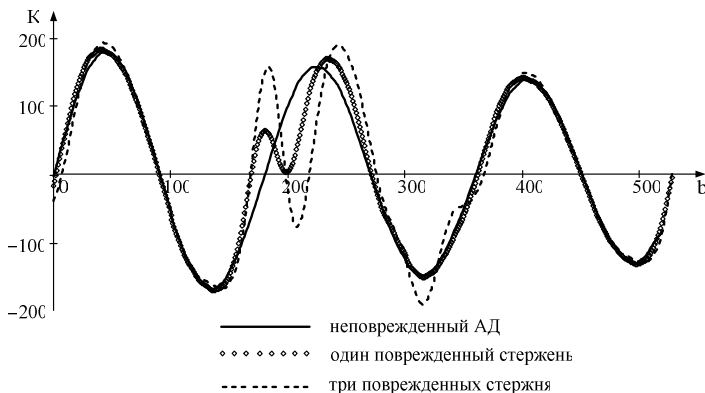


Рис. 7. Средние значения сумм коэффициентов вейвлет-разложения для неповрежденного АД и АД с повреждением одного и трех стержней ротора

Таким образом, диагностика повреждений стержней ротора АД с использованием вейвлет-преобразования сигнала ЭДС в обмотках статора после отключения АД от сети позволяет определять повреждения стержней ротора, а также взаимное расположение поврежденных стержней.

**Выводы.** Предложенная методика расчета электромагнитных процессов с использованием цепной модели АД и модели, базирующейся на МКЭ, позволяет оценить влияние повреждений стержней ротора на сигнал ЭДС обмотки фазы статора после отключения АД от сети.

Использование вейвлет-преобразования сигнала ЭДС в обмотках статора, полученного на основании расчета магнитного поля после отключения АД от сети, позволяет определять взаимное расположение поврежденных стержней ротора.

**Список литературы. 1.** Casimir R., Boutleux E., Clerc G., Chappuis F. Comparative Study of Diagnosis Methods for Induction Motor // Proc. Int. Conf. Electr. Mach. Brugge, Belgium, 2002, P. 465-470. **2.** Chia-Chou Yeh, Behrooz Mirafzal, Richard J. Povinelli, Nabeel A.O. Demerdash. A Condition Monitoring Vector Database Approach for Broken Bar Fault Diagnostics of Induction Machines // IEEE, 2005, P. 29-34. **3.** Nemeč M., Ambrožič V., Fišer R., Makuc D. Parameters estimation using single phase measurement of three phase induction machine // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 2011, No. 3, P. 129-132. **4.** Васильковский Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: Навч. посіб. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – 192 с. **5.** Калинов А.П., Ухань Ж.І., Урдин І.В. Метод діагностики пошко-

джен стержнів ротора // Вісник КДПУ. Зб. наук. праць КДПУ ім. М. Остроградського. – Вип. 4(57), Ч. 1. – Кременчук: КДПУ ім. М. Остроградського, 2009. – С. 98-101. **6.** *Ivanov-Smolensky A.* Electrical Machines: – Moscow: MIR Publishers. – 1983. – 280 p. **7.** <http://www.femm.info/wiki/HomePage>. **8.** *Гераскін О.А.* Вибродіагностика uszkodжень роторів потужних асинхронних двигунів на основі польових математичних моделей: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. – Київ, 2011. – 18 с. **9.** *Lokenath Debnath.* Wavelet Transforms And Time-Frequency Signal Analysis. Birkhäuser Boston. – 2001.



**Загірняк Михайл Васильевич**, д.т.н., професор, член-корреспондент Національної академії педагогічних наук України, Заслужений діяч науки і техніки України, ректор Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.



**Ромашина Жанна Іванівна**, аспірантка кафедри Систем автоматичного управління і електропривода Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.



**Калинов Андрій Петрович**, к.т.н., доцент кафедри Систем автоматичного управління і електропривода Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського.

*Поступила в редколлегию 05.09.2012*

УДК 621.313

**Діагностика повреждених стержней ротора в асинхронном двигателе на основании анализа его магнитного поля / Загірняк М.В., Ромашина Ж.И., Калинов А.П. // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Проблеми удоскона-**

лення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 38-48. Бібліогр.: 9 назв.

Проведено аналіз магнітного поля в робочому зазорі асинхронного двигуна при наявності пошкоджень стрижнів ротора після відключення машини від мережі з використанням методу кінцевих елементів. Запропоновано здійснювати вейвлет-аналіз розрахованого в результаті моделювання сигналу електро рушійної сили в обмотках статора, що дозволяє визначати розташування пошкоджених стрижнів ротора.

**Ключові слова:** асинхронний двигун, метод кінцевих елементів, вейвлет-аналіз.

The analysis of the magnetic field in the working gap of the induction motor in the presence of damaged rotor bars after disconnecting the machine from the network using the finite element method is carried out. It is proposed to carry out the wavelet analysis of the signal of the electromotive force in the stator windings calculated as a result of modeling that allows to determine the location of the damaged rotor bars.

**Keywords:** induction motor, finite element method, the wavelet analysis.