

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ТОКА СТАТОРА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ

Морозов А. Л. (Казанский Национальный Исследовательский Технический
Университет им. А. Н. Туполева – КАИ)

Тел.: +7 (843) 231-01-09; Факс.: +7 (843) 236-60-32; E-mail: kai@kai.ru

Abstract: In this paper, the well-known methods of processing of the stator current signals for fault diagnosis of the induction motors are considered and their main advantages and disadvantages for the implementation in embedded systems are highlighted. The previously proposed method based on a combination of the fast Fourier transform and the statistics of the fractional moments is optimized for implementation in embedded systems. The efficiency of the diagnosis of such faults as eccentricity and a broken rotor bar, using the proposed method, is verified on the stator's currents measurements of the real motors under different constant load levels: no load, 50% of the rated load, 75% of the rated load. The results show that this approach allows accurately diagnose the considered faults independently from the load level.

Key words: induction motors, condition monitoring, diagnosis, diagnosis, fault detection, fast Fourier transform, statistics of the fractional moments.

1. Введение

Асинхронные двигатели (АД) получили широкое распространение в промышленности [1], благодаря их надежности, производительности, простоте конструкции и относительно низкой стоимости. Однако, несмотря на это, АД подвержены неисправностям. Своевременное обнаружение неисправностей позволяет снизить стоимость ремонта, предотвратить аварийные ситуации и избежать остановки производства. В связи с этим повышается актуальность надежных систем мониторинга состояния АД. Предпочтительные средства мониторинга состояния – это маломощные, недорогие устройства, построенные на основе встраиваемых систем, использующих недорогие микроконтроллеры или маломощные процессоры. Данные системы имеют ограниченную производительность и малый объем памяти, поэтому разрабатываемые алгоритмы обработки сигналов для диагностики, должны быть достаточно эффективными, иметь приемлемую вычислительную сложность и требовать небольшой объем памяти.

Методы обнаружения неисправностей и диагностики АД классифицируются по измеряемым параметрам: крутящий момент, магнитный поток, температура, акустическая эмиссия, электрические токи и напряжения, и вибрации. Мониторинг электрического тока является одним из наиболее часто используемых параметров для диагностики АД, поскольку для измерения тока не требуется прямой доступ к двигателю, а также электрические токовые сигналы, не так сильно зашумлены как, например, вибрации (вибрационные сигналы исследуемого АД, как правило сильно «зашумляются» вибрациями рядом стоящего оборудования).

В таблице 1 представлены преимущества и недостатки известных методов обработки токовых сигналов для решения задач диагностики АД, с точки зрения реализации этих методов во встраиваемых системах.

На основе приведенного в таблице 1, выделены основные проблемы существующих методов:

Таблица 1. Методы обработки токовых сигналов, используемые для диагностики и контроля АД

Название метода и ссылки	Преимущества	Недостатки
Анализ токовых сигнатур двигателя на основе быстрого преобразования Фурье [2]	доступность на большом количестве платформ; высокая точность оценки сигнатур неисправностей; низкая вычислительная сложность.	эффект спектральной утечки; подверженность шумам; требуется длительная выборка данных; требуется информация о скольжении двигателя.
Методы высокого разрешения: MUSIC, ESPRIT [3, 4]	частотное разрешение не зависит от длины выборки.	большая вычислительная сложность; требуется информация о скольжении двигателя; требуется большое количество векторов наблюдений.
Анализ огибающей токового сигнала [5]	низкая вычислительная сложность.	требуется длительная выборка данных; требуется информация о скольжении двигателя.
Спектральный анализ на основе эмпирического разложения мод [6]	устойчивость к шумам; высокая точность оценки сигнатур неисправностей.	требуется большое количество выборок; требуется длительная выборка данных; высокая вычислительная сложность; требуется информация о скольжении двигателя.
Методы на основе вейвлет-преобразования [7, 8]	высокая точность оценки сигнатур неисправностей.	высокая вычислительная сложность; требуется длительная выборка данных; требуется информация о скольжении двигателя.

1) требуется большая выборка измерений. Это приводит к следующим сложностям: требуется большой объем памяти; увеличивается время выполнения вычислений, так как требуется обработать большой объем данных; необходимо, чтобы двигатель находился в устоявшемся режиме работы, который может быть потерян в течение длительного интервала сбора данных;

2) большая вычислительная сложность;

3) требуется априорная информация о скольжении двигателя.

Для решения проблемы требования большой выборки измерений, в [9] предложена комбинация Быстрого Преобразования Фурье (БПФ) и Статистики Дробных Моментов (СДМ) для диагностики дефекта в одном из стержней ротора. Этот метод позволяет сократить анализируемую временную выборку, сохраняя надежный результат диагностики. Данный метод основан на свойствах Функции Обобщенного Среднего (ФОС), которая была разработана в рамках СДМ в работах [10, 11]. Несмотря на успешное решение проблемы требования длительной выборки измерений, данный метод не исследован на возможность диагностировать различные неисправности под

различными уровнями нагрузки АД, так как в [9] рассматривалось только обнаружение дефекта в стержне ротора при работе двигателя с полной номинальной нагрузкой. Кроме этого, данный метод недостаточно оптимизирован для реализации во встраиваемых системах.

В данной статье продолжена разработка и исследование, предложенного в [9], комбинированного метода на основе БПФ и СДМ: метод оптимизирован для реализации во встраиваемых системах, с целью снижения требований к памяти и вычислительных затрат. А именно: к измерениям применяется децимация и процедура выделения информативного частотного диапазона, с целью уменьшения объема обрабатываемого набора данных. Подобраны оптимальные значения для следующих параметров предложенного метода, а именно: результирующая частота после децимации – 1 кГц; длина анализируемой выборки – 0.2 с. В результате требуется единовременно хранить лишь 200 отсчетов. Кроме этого, предложенный метод исследован на зависимость результатов диагностики от скольжения двигателя и на возможность диагностировать такие дефекты как эксцентриситет и дефект в стержне ротора (ранее в [9] было исследовано только обнаружение дефекта в стержне ротора). Диагностика выполнена при обработке данных, полученных от АД при различных уровнях постоянной нагрузки: 0%, 50% и 75% от номинальной нагрузки. В указанных условиях были измерены электрические токи фаз статора двигателей в различных состояниях: исправный двигатель, двигатель с дефектом в одном стержне ротора, двигатель с эксцентриситетом. Полученные результаты доказывают эффективность предложенного метода, а также его пригодность для реализации в виде алгоритма для встраиваемых систем в средствах непрерывного мониторинга технического состояния АД.

2. Комбинированный метод обработки сигналов на основе быстрого преобразования Фурье и статистики дробных моментов

2.1 Модификации существующего метода

В данной работе представлен оптимизированный для реализации во встраиваемых системах комбинированный метод обработки сигналов на основе быстрого преобразования Фурье и Статистики Дробных Моментов (СДМ), к которому дополнительно, введена процедура децимации и процедура выделения информативного частотного диапазона.

Децимация используется для сокращения количества данных, которые необходимо хранить для последующей обработки. Таким образом уменьшается объем требуемой памяти. Информативный Частотный Диапазон (ИЧД) – это отрезок Фурье спектра, ограниченный определенным частотным диапазоном. Использование ИЧД вместо всего Фурье спектра уменьшает требуемое количество вычислений и повышает чувствительность метода, так как в вычислениях отсутствуют неинформативные гармоники.

2.2 Алгоритм реализующий предложенный метод

Предложенный метод, реализуется алгоритмом, состоящим из следующих шагов:

1. α - β преобразование

Трехфазные токи статора ИМ представляются как вращающийся пространственный вектор в системе отсчета, прикрепленной к фазовой плоскости статора. Действительная ось α совмещена с осью одной из обмоток статора, а мнимая ось β сдвинута по фазе на 90 градусов. Преобразование координат от измеренных токов фаз i_u, i_v, i_w , к координатам i_α, i_β получается матричной операцией:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix}$$

2. Децимация

Представим выборку токового сигнала x , как вектор наблюдения \mathbf{x}^T :

$$\mathbf{x}^T = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_M]$$

$$M = T \cdot F_s$$

где M – общее количество измерений, T – интервал сбора данных, а F_s – исходная частота дискретизации. Децимация с помощью процесса усреднения дает сигнал y , который можно представить как вектор наблюдения \mathbf{y}^T :

$$\mathbf{y}^T = \left[\frac{1}{K_d} \sum_{j=1}^{K_d} x_j \quad \frac{1}{K_d} \sum_{j=K_d+1}^{2K_d} x_j \quad \dots \quad \frac{1}{K_d} \sum_{j=M-K_d+1}^M x_j \right]$$

$$K_d = \frac{F_s}{F_{dec}}$$

где K_d – коэффициент децимации и F_{dec} – частота, полученная после децимации. Размер N вектора \mathbf{y}^T после децимации равен:

$$N = \frac{M}{K_d}$$

Для дальнейшей обработки достаточно хранить только сигнал y , представленный буфером данных размера N , который в K_d раз меньше, исходного вектора \mathbf{x}^T .

3. Быстрое преобразование Фурье

Вычисление полного спектра сигнала выполняется с помощью Быстрого Преобразования Фурье (БПФ), согласно следующему выражению:

$$fftFull_k = \left| \sum_{j=1}^N y(j) e^{\frac{(-2\pi i)(j-1)(k-1)}{N}} \right|$$

$$fFull_k = k \frac{F_{dec}}{N}$$

где y – сигнал после децимации, N – количество точек после децимации, $fftFull(k)$ – модуль амплитуд полного спектра Фурье, $fFull(k)$ – частоты полного спектра Фурье, $k=1,2,\dots,N$. Для того чтобы не рассматривать реальную и мнимую части отдельно, используется модуль.

4. Выделение информативного частотного диапазона

Каждый дефект по-разному влияет на спектр тока. Для того, чтобы анализировать только информативную часть спектра, введена процедура выделения Информативного Частотного Диапазона (ИЧД). ИЧД зависит от: частоты питающего напряжения, типа анализируемой неисправности, результирующей частоты после децимации.

$$IFR_l = fftFull_p$$

$$p = p_{min}, \dots, p_{max}, p_{min} = \text{floor}\left(f_{min} \frac{N}{F_{dec}}\right), p_{max} = \text{floor}\left(f_{max} \frac{N}{F_{dec}}\right)$$

$$l = 1, 2, \dots, p_{max} - p_{min}$$

где IFR – отрезок амплитуд спектра Фурье, входящий в ИЧД, f_{min} – нижняя граница ИЧД, f_{max} – верхняя граница ИЧД, $\text{floor}()$ – операция округления до целого. Выражения для индексов p_{min} и p_{max} получены исходя из выражения для частот спектра (7).

В данной работе рассматривается диагностика таких неисправностей как эксцентриситет и дефект в стержне ротора. Для данных неисправностей подобран ИЧД – $f_{min} = 25 \text{ Гц}$, $f_{max} = 125 \text{ Гц}$. Отрезок амплитуд, входящих в ИЧД, обозначим – IFR .

5. Вычисление Функции Обобщенного Среднего

ФОС вычисляется для отрезков спектра Фурье, которые входят в ИЧД – IFR . ФОС вычисляется согласно следующему выражению:

$$\Delta_{(mom_p)} = \left(\sum_{i=1}^L IFR_i^{mom_p} \right)^{1/mom_p}$$

где L – число амплитуд, входящих в отрезок спектра, в ИЧД, а mom_p – порядок момента, который может быть вычислен согласно:

$$mom_p = \exp \left\{ \min + \frac{P}{P} (\max - \min) \right\}$$

где \min , \max и P – параметры ФОС, а $p = 1, 2, \dots, P$. Значения \min и \max определяют пределы в логарифмической шкале, P – коэффициент, определяющий разрешение порядков момента. Оптимальные значения этих параметров подобраны в работе [9] и имеют следующие значения $P = 75$, $\min = -15$, $\max = 15$.

6. Расчет наклонов

ФОС, вычисленная на предыдущем шаге, сравнивается с эталонной ФОС. Для сравнения ФОС между собой, вычисляется наклон ФОС, полученной для тестируемого двигателя, относительно ФОС, полученной для эталонного двигателя. В данной работе, эталонного двигателя рассматривается исправный АД без нагрузки. Наклоны рассчитываются с использованием линейного метода наименьших квадратов, который является хорошо известным и не раскрывается в данной работе.

7. Сравнение наклонов

На этом этапе вычисленные наклоны сравниваются с заранее определенными значениями, полученными для АД в различных состояниях. На основе этого делается заключение о состоянии испытуемого двигателя.

3. Экспериментальное исследование

3.1 Описание экспериментальной установки

На рис. 1 (а) показаны схема и фотография лабораторного испытательного стенда, используемого для получения экспериментальных данных. Использовались три идентичных АД, запитанных напрямую, без использования частотных регуляторов. Первый АД – исправный; у второго АД в одном из стержней ротора, просверлено отверстие в торцевом кольце рис. 1 (б). В третьем АД оригинальные подшипники были заменены новыми подшипниками с меньшим наружным и большим внутренним диаметром, а эксцентриковые втулки были установлены точно между валом ротора и подшипником, а также между подшипником и корпусом подшипника, чтобы спровоцировать нарушение эксцентриситета рис. 1 (в). Механическая нагрузка

создавалась с помощью синхронной машины с постоянными магнитами, которая управлялась сервоприводом. Ток измерялся токовыми зажимами, измеренные сигналы записывались на цифровой осциллограф. Длительность записанной выборки – 100 секунд, частота дискретизации – 100 кГц. Измерения проводились при следующих уровнях нагрузки АД: без нагрузки (0%), половина номинальной нагрузки (50%) и три четверти номинальной нагрузки (75%) для каждого АД. Используемый двигатель – трехфазный IM Siemens UD 1010/71980410-10, с соединением звездой и номинальными характеристиками: $P=1.5\text{ кВт}$, $f=50\text{ Гц}$, $U=300\text{ В}$, $I=3,25\text{ А}$, $n=2860\text{ об/мин}$, $\cos\varphi=0,85$. Используемая асинхронная машина для нагрузки – асинхронная машина с постоянными магнитами ABB MS4839N4008E43C10 с номинальными характеристиками $I_n=14,4\text{ А}$, $P_n=4,9\text{ кВт}$, $F_n=200\text{ Гц}$, $N_n=3000\text{ об/мин}$.

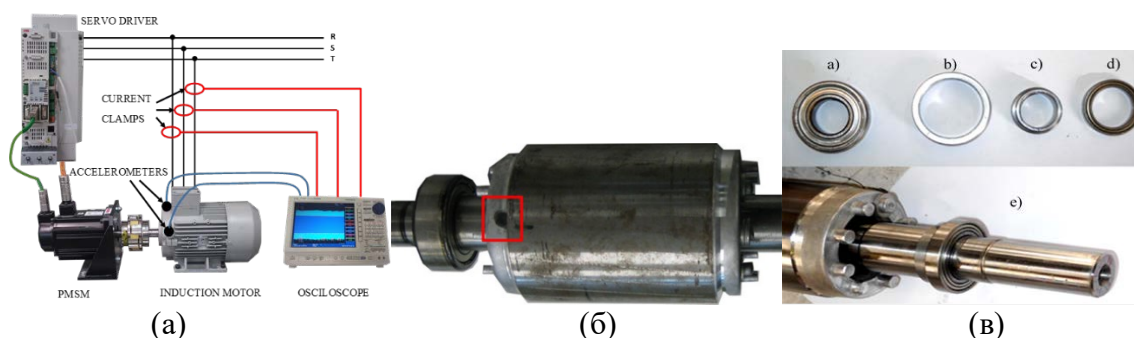


Рис. 1. (а) принципиальная схема лабораторного испытательного стенда, (б) ротор с дефектом в стержне, (в) ротор с эксцентриситетом: а) оригинальный подшипник, б) наружная эксцентриковая втулка, с) внутренняя эксцентриковая втулка, д) новый подшипник, е) втулки и подшипник, установленные на валу ротора

3.2 Диагностика АД без нагрузки с помощью предложенного метода

В предложенном подходе, настраиваемыми параметрами являются коэффициент децимации и временное окно. Временное окно, соответствует минимальной длине выборки, необходимой предложенному алгоритму для диагностики неисправностей. В данной работе, оба этих параметра подобраны эмпирически, обеспечивая компромисс между наименьшими вычислительными затратами и затратами памяти, с одной стороны, и точными результатами диагностики с другой: коэффициент децимации – 100 (результатирующая частота $F_{dec} = 1\text{ кГц}$), временное окно $T = 0.2\text{ секунд}$.

Длина общей выборки измерения, для каждого рассматриваемого двигателя – 100 с. Для оценки эффективности предложенного алгоритма, данная выборка была разделена на отрезки, длина которых равна выбранному временному окну – $T = 0.2\text{ с}$. В результате было получено 500 непересекающихся и независимых отрезков. Для каждого такого отрезка был применен предложенный алгоритм.

На рис. 2 показаны токовые сигналы, после α - β преобразования, рассматриваемых двигателей без нагрузки: исправный двигатель, двигатель с дефектом в стержне ротора, двигатель с эксцентриситетом. Следующим этапом предложенного алгоритма является децимация. Децимация применялась к исходным данным с частотой дискретизации $F_{orig} = 100\text{ кГц}$. Частота дискретизации после децимации равна $F_{dec} = 1\text{ кГц}$. После децимации, к полученным данным применялось БПФ. На рис. 3 показаны полученные спектры. Следующим шагом вычислялись ФОС для ИЧД полученных спектров I_{FR} . На рис. 4 (а), представлены ФОС относительно порядка момента, на рис. 4 (б) показаны наклоны полученных ФОС относительно ФОС, полученной для исправного двигателя без нагрузки.

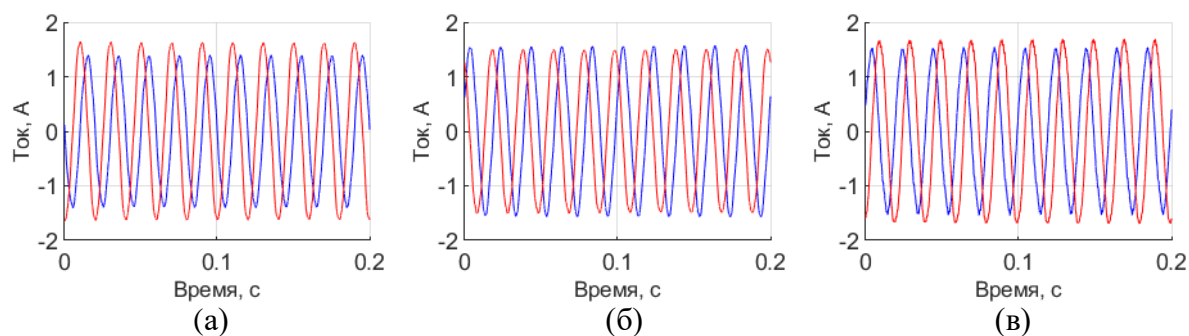


Рис. 2. Исходные сигналы, полученные от АД без нагрузки: (а) исправный двигатель, (б) двигатель с дефектом в стержне ротора, (в) двигатель с эксцентриситетом

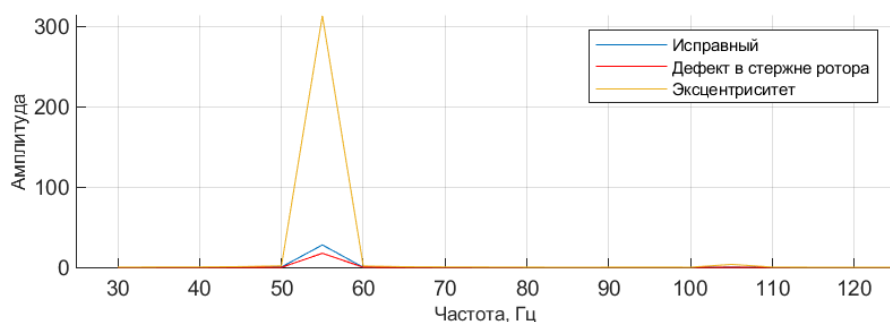


Рис. 3. Отрезки Фурье спектров АД без нагрузки

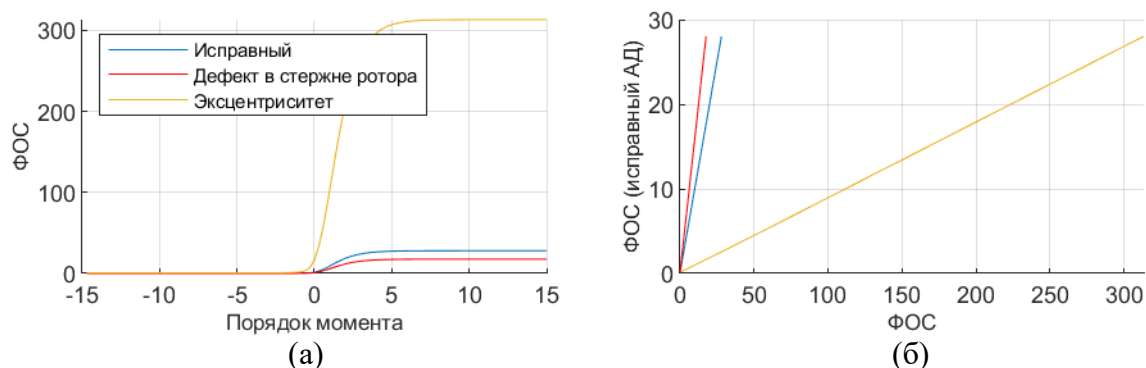


Рис. 4. ФОС спектров двигателей без нагрузки. (а) – зависимость ФОС от порядка момента (б) зависимость ФОС исправного двигателя от ФОС всех рассматриваемых двигателей.

3.3. Обнаружение неисправностей при различных уровнях нагрузки

В этом разделе проверяется чувствительность предлагаемого подхода к различным уровням нагрузки. Показано, что метод эффективен и может воспроизводить одни и те же результаты диагностики независимо от уровня нагрузки. Рассматриваются различные уровни постоянной нагрузки: без нагрузки, 50% от номинальной нагрузки, 75% от номинальной нагрузки. Для анализа воспроизводимости подхода, исходные данные были поделены на 500 независимых и непересекающихся частей, которые подвергались обработке, предложенным методом отдельно и независимо, аналогично тому, как это сделано в предыдущем разделе. После обработки данных предложенным методом, получены значения наклонов ФОС для рассматриваемых типов двигателей при различных уровнях нагрузки. Наклоны

рассчитывались относительно ФОС, полученной для исправного двигателя без нагрузки. Полученные наклоны представлены на рис. 5.

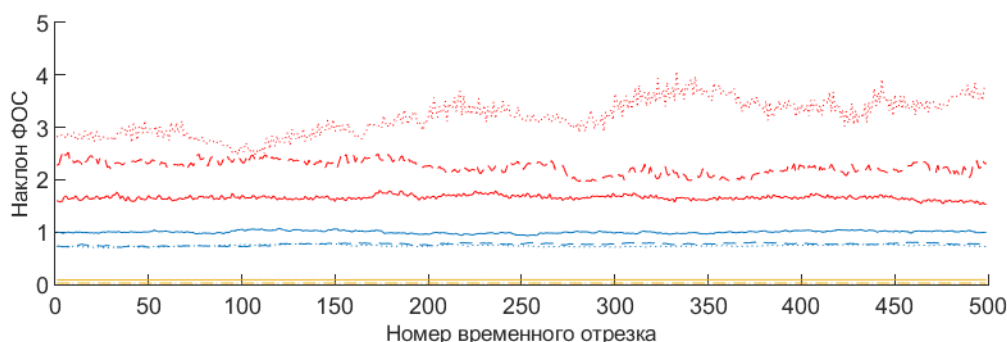


Рис. 5. Наклоны ФОС, полученные для исследуемых двигателей при различных уровнях нагрузки: голубые кривые соответствуют исправному двигателю, красные – двигателю с дефектом в стержне ротора, желтые – двигателю с эксцентриситетом; сплошные кривые соответствуют измерениям без нагрузки, штриховые кривые соответствуют измерениям при 50% нагрузкой, пунктирные – измерениям при 75 % нагрузки

На рис. 5 видно, что данные, полученные для исправного двигателя (голубые кривые), не пересекаются с данными, полученными для двигателя с эксцентриситетом (желтые кривые) и данными, полученными для двигателя с дефектом в стержне ротора (красные кривые). Таким образом данные от разных двигателей можно отличить между собой и соответственно диагностировать состояния двигателя. Результаты показывают, что предложенный подход позволяет точно диагностировать рассматриваемые неисправности, независимо от уровня нагрузки.

Статистические параметры, такие как среднее, минимальное и максимальное значения наклонов, полученных для всех рассмотренных АД, при всех рассмотренных уровнях нагрузки, представлены в таблице 2. Данная таблица может быть использована для принятия решений о состоянии неисправности АД.

Таблица 2. Статистические параметры наклонов ФОС

Тип АД	Среднее значение наклона ФОС	Максимальное значение наклона ФОС	Минимальное значение наклона ФОС
Исправный	0.84	1.07	0.71
Дефект в стержне ротора	2.37	4.07	1.52
Эксцентриситет	0.05	0.09	0.03

4. Заключение

В работе предложен метод обработки токовых сигналов фаз статора для решения задач диагностики и контроля АД. Предлагаемый подход представляет собой комбинацию двух методов: Быстрого Преобразования Фурье (БПФ) и Статистики дробных моментов (СДМ). Результаты показывают, что предложенный подход позволяет обнаружить и выделить все рассматриваемые неисправности: эксцентриситет и дефект в стержне ротора, независимо от уровня нагрузки.

Одной из специфических особенностей предложенного метода является независимость от уровня нагрузки, поэтому ввод дополнительной информация о

скольжении двигателя или частоте вращения ротора не требуется. Такая особенность подразумевает, что возможная автоматическая система обнаружения, основанная на предложенном подходе, имеет меньшую сложность, поскольку не требуется: датчик измерения частоты вращения ротора или ручной ввод этого значения.

Другой особенностью предложенного подхода является то, что необходимая выборка имеет очень малую длину, а именно 0.2 секунды. Кроме того, объем данных, хранящихся для анализа, также мал, поскольку используется децимация. Число точек, используемых для анализа (т.е. количество отсчетов, которые необходимо хранить при выполнении обработки данных) $N = TF_{dec} = 0.2 \cdot 1000 = 200$. Количество вычислений значительно сокращено по сравнению с методом в [9], поскольку для анализа используется отрезок Фурье спектра, определяемый ИЧД. Разработанный подход, имеет низкую вычислительную сложность и требует малый объем памяти, может быть реализован его во встраиваемых системах, для мониторинга технического состояния АД.

Список литературы: 1. P. Waide and C. Brunner, «Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems,» *IEA Energy Papers*, 2011. 2. Jee-Hoon Jung, Jong-Jae Lee, and Bong-Hwan Kwon, "Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 53, no. 6, pp. 1842-1852, 2006. 3. El Houssin El Bouchikhi, Vincent Choqueuse, Mohamed Benbouzid, "Induction Machine Diagnosis using Stator Current Advanced Signal Processing," *International Journal on Energy Conversion*, vol. 3, no. 3, pp. 76-87, 2015. 4. D. Morinigo-Sotelo, R. de J. Romero-Troncoso, P. A. Panagiotou, J. A. Antonino-Daviu and K. N. Gyftakis, «Reliable Detection of Rotor Bars Breakage in Induction Motors via MUSIC and ZSC,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, т. 54, № 2, pp. 1224-1234,, 2018. 5. A. Sapena-Bano, M. Pineda-Sanchez, R. Puche-Panadero, Z. Kanovic, «Low-cost diagnosis of rotor asymmetries in induction machines working at a very low slip using the reduced envelope of the stator current,» *IEEE Trans. Energy Convers*, т. 30, № 4, pp. 1409-1419, 2015. 6. S. Sbaa, N. Bessous, R. Pusca and R. Romary, «A comparative study dedicated to rotor failure detection in induction motors using MCSA, DWT, and EMD techniques,» *International Conference on Electrical Engineering (ICEE) 2020*, pp. 1-11, 2020. 7. S. M. K. Zaman, X. Liang and W. Li, «Fault Diagnosis for Variable Frequency Drive-Fed Induction Motors Using Wavelet Packet Decomposition and Greedy-Gradient Max-Cut Learning,» *IEEE Access*, т. 9, pp. 65490-65502, 2021. 8. W. Dehina, M. Boumehraz and F. Kratz, «Diagnosis and Detection of Rotor Bars Faults in Induction Motor Using HT and DWT Techniques,» *18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, pp. 109-115, 2021. 9. A. L. Morozov, R. R. Nigmatullin, P. Lino, G. Maione, S. Stasi, "An Improved Nonparametric Method for Fault Detection of Induction Motors Based on the Statistics of the Fractional Moments," *Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, pp. 386-391, 2018. 10. R. R. Nigmatullin, «The statistics of the fractional moments: Is there any chance to “read quantitatively” any randomness?,» *Journal of Signal Processing*, т. 86, p. 2529–2547, 2006. 11. R. R. Nigmatullin, C. Ceglie, G. Maione, D. Striccoli, «Reduced fractional modeling of 3D video streams: the FERMA approach,» *Nonlinear Dynamics*, т. 80, № 4, p. 1869–1882, 2015.