

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ВИБРОСИГНАЛОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ОПТИМИЗИРОВАННЫЙ ДЛЯ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ



А. Л. Морозов,
Казанский национальный
исследовательский
технический университет
им. А. Н. Туполева – КАИ,
Казань, Россия.
E-mail: kai@kai.ru

Рассмотрены существующие методы обработки вибросигналов для решения задач диагностики и контроля, выделены их основные преимущества и недостатки с точки зрения возможности их реализации во встраиваемых системах. Предложенный ранее метод обработки сигналов на основе комбинации быстрого преобразования Фурье и статистики дробных моментов оптимизирован для обработки вибросигналов и реализации во встраиваемых системах. Эффективность диагностики таких неисправностей, как эксцентриситет и дефект в стержне ротора, с помощью предложенного метода верифицирована на измерениях радиальных вертикальных вибраций реальных двигателей под разными уровнями постоянной нагрузки: без нагрузки, 50 % от номинальной нагрузки, 75 % от номинальной нагрузки. Результаты исследований показывают, что такой подход позволяет точно диагностировать рассмотренные неисправности независимо от уровня нагрузки.

Ключевые слова: асинхронные двигатели, контроль состояния, диагностика, обнаружение неисправностей, обработка сигналов, вибрационный анализ, быстрое преобразование Фурье, статистика дробных моментов.

A. L. Morozov
(Kazan National Research Technical University
named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia)

COMBINED SIGNAL PROCESSING METHOD FOR DIAGNOSIS AND MONITORING OF THE INDUCTION MOTORS OPTIMIZED FOR EMBEDDED SYSTEMS

Induction Motors (IM) play a key role in modern industry, so the condition monitoring systems are becoming increasingly relevant. Commercial monitoring systems are usually based on the measurement of IM's vibrations and the further processing of the measured vibration signals. For those purposes the embedded systems (such as microcontrollers and inexpensive processors) are used. Embedded systems have limited resources, so data processing algorithms should have low computational complexity and require little memory. In this paper, the well-known methods of processing vibration signals for fault diagnosis of the IM 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 vibration signal processing and implementation in embedded systems. The efficiency of diagnosis of such faults as eccentricity and a broken rotor bar, using the proposed method, is verified on the radial vertical vibrations 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.

Keywords: induction motors, condition monitoring, diagnosis, fault detection, diagnosis, fault detection, signal processing, vibration analysis, fast Fourier transform, statistics of the fractional moments.



Асинхронные двигатели (АД) получили широкое распространение в промышленной, коммерческой, жилищной, сельскохозяйственной и транспортной сферах [1]. Основные причины распространенности АД заключаются в их надежности, безопасности, производительности, простоте конструкции при относительно низкой стоимости. Несмотря на это, АД подвержены неисправностям. Работа АД в неисправном состоянии порождает рост дефекта. Это приводит к удорожанию ремонта, остановке производства, увеличению риска аварии.

Все это повышает актуальность надежных средств мониторинга состояния АД. Предпочтительные средства мониторинга состояния – это маломощные, недорогие устройства, построенные на основе встраиваемых систем, использующих микроконтроллеры или маломощные процессоры. Данные системы имеют ограниченную производительность и малый объем памяти, поэтому разрабатываемые алгоритмы обработки сигналов для диагностики и контроля должны быть достаточно эффективными, иметь приемлемую вычислительную сложность и требовать минимального объема памяти.

Методы обнаружения неисправностей и диагностики АД классифицируются по измеряемым параметрам: крутящему моменту, магнитному потоку, температуре, акустической эмиссии, электрическому току и напряжению, механическим вибрациям. В коммерческих решениях наиболее распространенными являются системы мониторинга вибраций,

так как анализ вибраций позволяет обнаружить типичные неисправности АД.

В научно-технической литературе предложено множество методов обработки вибросигналов для диагностики и контроля АД. В табл. 1 представлены преимущества и недостатки известных методов обработки вибросигналов для решения задач диагностики и контроля АД с точки зрения реализации этих методов во встраиваемых системах.

На основе табл. 1 выделим основные проблемы существующих методов обработки вибрационных сигналов:

1) для получения результатов диагностики требуется большая выборка измерений. Это приводит к следующим сложностям: необходимости большого объема памяти; увеличению времени выполнения вычислений; необходимости нахождения двигателя в устоявшемся режиме работы, который может быть потерян в течение длительного интервала сбора данных;

2) обработка представляет собой большую вычислительную сложность;

3) требуется априорная информация о скольжении двигателя или частоте вращения. Это означает, что для получения этой информации нужен дополнительный датчик или должен быть встроен дополнительный алгоритм, вычисляющий этот параметр (как в работе [15]), или оператор должен ввести эту информацию вручную. Во всех перечисленных случаях возрастает сложность системы.

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

Метод	Преимущества	Недостатки
Спектральный анализ на основе быстрого преобразования Фурье [2 – 5]	Доступность на большом количестве платформ; точность оценки сигнатур неисправностей; низкая вычислительная сложность	Эффект спектральной утечки; подверженность шумам; длительность выборки данных; необходимость информации о скольжении двигателя
Анализ огибающей вибрационного сигнала [6, 7]	Низкая вычислительная сложность	Длительность выборки данных; необходимость информации о скольжении двигателя
Спектральный анализ на основе эмпирического разложения мод [8 – 11]	Устойчивость к шумам; точность оценки сигнатур неисправностей	Необходимость большого количества выборок; длительность выборки данных; высокая вычислительная сложность; необходимость информации о скольжении двигателя
Методы на основе вейвлет-преобразования [12, 13]	Точность оценки сигнатур неисправностей	Длительность выборки данных; высокая вычислительная сложность; необходимость информации о скольжении двигателя
Методы на основе нейронных сетей [6, 14]	Устойчивость к шумам; низкая вычислительная сложность	Сложность обучения; необходимость переобучения для разных типов АД

Для решения проблем большой выборки измерений и информации о скольжении двигателя в работе [16] предложена комбинация *быстрого преобразования Фурье* (БПФ) и *статистики дробных моментов* (СДМ) для обнаружения дефекта в одном из стержней ротора. Данный метод основан на свойствах *функции обобщенного среднего* (ФОС), которая была разработана в рамках СДМ в работах [17 – 19]. Метод позволяет сократить анализируемую временную выборку, сохраняя надежный результат диагностики. Однако данный метод не оптимизирован для реализации во встраиваемых системах, а также не исследованы следующие возможности: выполнения диагностики на основе вибросигналов; обнаружения и диагностирования других неисправностей (кроме дефекта в стержне ротора); осуществления диагностики под различными уровнями нагрузки.

В данной статье продолжена разработка и исследование комбинированного метода на основе БПФ и СДМ. Метод оптимизирован для реализации во встраиваемых системах в целях снижения требований к памяти и вычислительных затрат, а именно, к измерениям применяется децимация, внедрена процедура выбора информативного частотного диапазона. Подобраны оптимальные значения для следующих параметров предложенного метода: результирующая частота после децимации 1 кГц; длина анализируемой выборки 0,5 с. В результате требуется одновременно хранить лишь 500 отсчетов.

Кроме того, метод исследован на возможность диагностики дефекта в стержне ротора и эксцентриситета по вибрационным сигналам. 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 радиальные вертикальные вибрации двигателей в различных состояниях: исправный двигатель, двигатель с дефектом в одном стержне ротора, двигатель с эксцентриситетом.

Полученные результаты позволяют использовать предложенный метод для диагностики АД в виде алгоритма, исполняемого на микроконтроллерах в системах непрерывного мониторинга состояния.

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

Модификации существующего метода

Метод, предложенный в работе [16], в данной статье модифицирован, чтобы уменьшить требуемую память и снизить вычислительные затраты.

Современное измерительное оборудование позволяет существенно увеличить частоту дискретизации. Более того, современные сенсорные технологии значительно снижают уровень шума даже при высокой частоте дискретизации. Отметим, что высокочастотная информация также полезна для обнаружения неисправностей [20]. Однако высокая частота дискретизации увеличивает объем требуемой памяти. Поэтому в предложенном методе вводится процедура децимации за счет усреднения. Таким образом, для дальнейшего анализа используется только среднее значение нескольких измерений. В данной работе коэффициент децимации был подобран эмпирически. Результирующая частота после децимации с использованием выбранного коэффициента составляет 1 кГц.

Еще одна модификация заключается в использовании для вычисления ФОС только информативного частотного диапазона из Фурье-спектра. *Информативный частотный диапазон* (ИЧД) – это отрезок Фурье-спектра, ограниченный определенным частотным диапазоном. Сам частотный диапазон выбирается исходя из типа анализируемого дефекта. Это позволяет уменьшить требуемое количество вычислений, повысив чувствительность метода, так как в вычислениях ФОС будут отсутствовать неинформативные гармоники.

Алгоритм, реализующий предложенный метод

Предложенный метод реализуется алгоритмом, состоящим из следующих шагов:

1. Децимация

Представим входную выборку исходного вибрационного сигнала x как вектор наблюдения \mathbf{x}^T :

$$\mathbf{x}^T = [x_1 x_2 \dots x_M], \quad (1)$$

$$M = T F_s, \quad (2)$$

где M – общее количество измерений; T – временной интервал сбора данных; F_s – исходная частота дискретизации.

Децимация с помощью процесса усреднения дает сигнал y , который можно представить как вектор наблюдения \mathbf{y}^T :

$$\mathbf{y}^T = \left[\frac{1}{K_d} \sum_{j=1}^{K_d} x_j \quad \frac{1}{K_d} \sum_{j=K_d+1}^{2K_d} x_j \quad \dots \quad \frac{1}{K_d} \sum_{j=M-K_d+1}^M x_j \right], \quad (3)$$

$$K_d = \frac{F_s}{F_{dec}}, \quad (4)$$

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

$$N = \frac{M}{K_d}. \quad (5)$$

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

2. Быстрое преобразование Фурье

Вычисление полного спектра сигнала выполняется с помощью БПФ по выражению

$$fftFull_k = \left| \sum_{j=1}^N y(j) e^{\frac{(-2\pi i)(j-1)(k-1)}{N}} \right|, \quad (6)$$

$$fFull_k = k \frac{F_{dec}}{N}, \quad (7)$$

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, в формуле (6) используется модуль.

3. Выделение информативного частотного диапазона

Каждый дефект по-разному влияет на спектр вибрационных сигналов. Для того чтобы анализировать только информативную часть спектра, введена процедура выделения ИЧД. Процедура ИЧД зависит от: частоты питающего напряжения, типа анализируемой неисправности, результирующей частоты после децимации. Выделение ИЧД происходит по следующему выражению:

$$IFR_l = fftFull_p, \quad (8)$$

$$l = 1, 2, \dots, p_{\max} - p_{\min}, \quad (9)$$

$$p = p_{\min}, \dots, p_{\max}, p_{\min} = \left\lfloor f_{\min} \frac{N}{F_{dec}} \right\rfloor, \quad (10)$$

$$p_{\max} = \left\lfloor f_{\max} \frac{N}{F_{dec}} \right\rfloor,$$

где IFR – отрезок спектра Фурье, входящий в ИЧД; f_{\min} – нижняя граница ИЧД; f_{\max} – верхняя граница ИЧД; $\left\lfloor \cdot \right\rfloor$ – операция округления до целого.

В данной работе рассматривается диагностика таких неисправностей, как эксцентриситет и дефект

2. Информативные частотные диапазоны для диагностики АД

ИЧД для диагностики дефекта в стержне ротора	ИЧД для диагностики эксцентриситета
0...70 Гц	320...400 Гц

в стержне ротора. Подобранные для данных неисправностей ИЧД представлены в табл. 2. Отрезок спектра, входящий в ИЧД для диагностики эксцентриситета, обозначим IFR_{ecc} , для диагностики дефекта(ов) в стержне ротора – IFR_{brb} . Данные значения подобраны для случая, когда частота питания двигателя составляет 50 Гц.

4. Вычисление функции обобщенного среднего

ФОС вычисляется для отрезков спектра Фурье, которые входят в ИЧД, – IFR_{ecc} и IFR_{brb} . ФОС вычисляется по следующему выражению:

$$\Delta_{(mom_p)} = \left(\sum_{i=1}^L IFR_i^{mom_p} \right)^{1/mom_p}, \quad (11)$$

где L – число гармоник, входящих в отрезок спектра, в рассматриваемом ИЧД; mom_p – порядок момента, который может быть вычислен согласно

$$mom_p = \exp \left\{ \min + \frac{P}{P} (\max - \min) \right\}, \quad (12)$$

\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 работах [17, 18] и имеют следующие значения $P = 75$, $\min = -15$, $\max = 15$.

5. Расчет наклонов

ФОС, вычисленная на предыдущем шаге, сравнивается с эталонной ФОС. Для сравнения ФОС между собой вычисляется наклон ФОС, полученной для тестируемого двигателя, относительно эталонной ФОС. В данной работе в качестве эталонной ФОС используется ФОС, полученная для исправного АД без нагрузки. Наклоны рассчитываются с использованием хорошо известного линейного метода наименьших квадратов.

6. 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 тестируемого двигателя.

Экспериментальное исследование предложенного метода

Экспериментальная установка

На рис. 1 показаны схема и внешний вид лабораторного испытательного стенда для получения экспериментальных данных. Были использованы три идентичных АД, запитанных напрямую без частотных регуляторов. Первый АД был исправен; у второго АД в одном из стержней ротора было просверлено отверстие в торцовом кольце (рис. 2, а). 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, что показано на рис. 2, б. Механическую нагрузку создавали с помощью синхронной машины с постоянными магнитами, которая управлялась серво-

приводом. Подробная информация о характеристиках двигателя и нагрузки приведена в Приложении.

Вибрации регистрировали с помощью высокочувствительного акселерометра с чувствительностью 100 мВ/г, установленного с помощью магнитных креплений. Размещение датчика выполнено согласно рекомендациям ГОСТ ИСО 10816-1-97. Датчик подключен к цифровому осциллографу. Длительность записанной выборки 100 с, частота дискретизации 100 кГц.

Измерения проводили при следующих уровнях нагрузки АД: без нагрузки (0 %), половина номинальной нагрузки (50 %) и три четверти номинальной нагрузки (75 %) для каждого АД.

Диагностика АД без нагрузки с помощью предложенного метода

В предложенном подходе настраиваемыми параметрами являются коэффициент децимации и временное окно. Временное окно соответствует

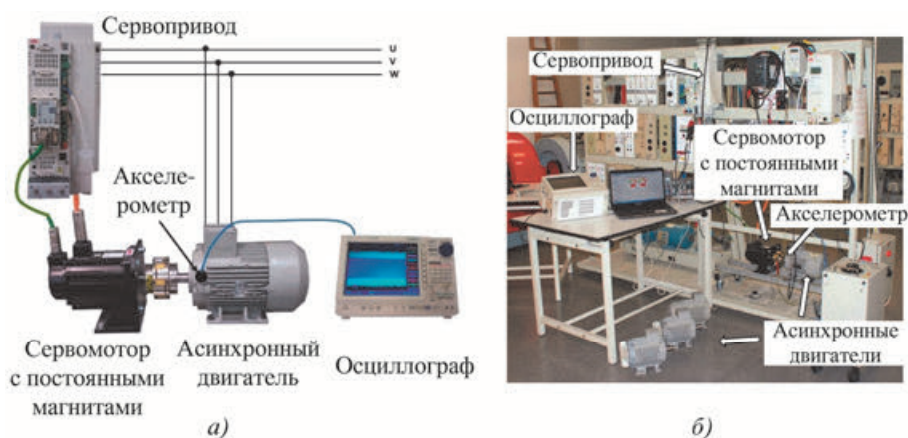


Рис. 1. Лабораторный испытательный стенд:

а – принципиальная схема; б – внешний вид

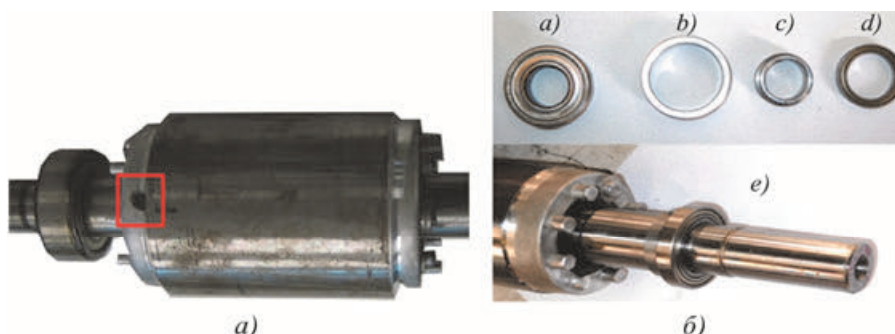


Рис. 2. Экспериментальные АД:

а – ротор с дефектом в стержне; б – 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

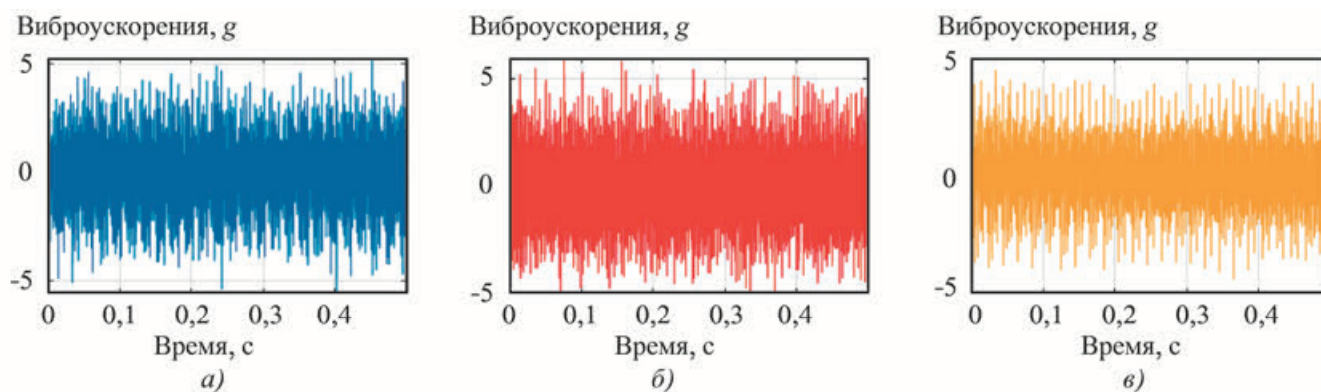


Рис. 3. Исходные сигналы, полученные от АД без нагрузки:

а – исправный двигатель; *б* – двигатель с дефектом в стержне ротора; *в* – двигатель с эксцентриситетом

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 $F_{dec} = 1$ кГц), временное окно $T = 0,5$ с. 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 $T = 0,5$ с. В результате было получено 200 непересекающихся и независимых отрезков. Для каждого такого отрезка был применен предложенный алгоритм.

На рис. 3 показаны исходные вибрационные сигналы рассматриваемых двигателей без нагрузки: исправный двигатель, двигатель с дефектом в стержне ротора, двигатель с эксцентриситетом.

Первым этапом предложенного алгоритма является децимация. Децимация применялась к исходным данным с частотой дискретизации $F_{orig} = 100$ кГц. Частота дискретизации после децимации равна $F_{dec} = 1$ кГц. После децимации к полученным данным применялось БПФ. На рис. 4 показаны полученные спектры. Следующим шагом вычислялись ФОС для ИЧД полученных спектров IFR_{ecc} , IFR_{brb} . На рис. 5, *а*, *б* представлены ФОС относительно порядка момента, на рис. 5 *в*, *г* показаны наклоны полученных ФОС относительно ФОС, полученной для исправного двигателя без нагрузки.

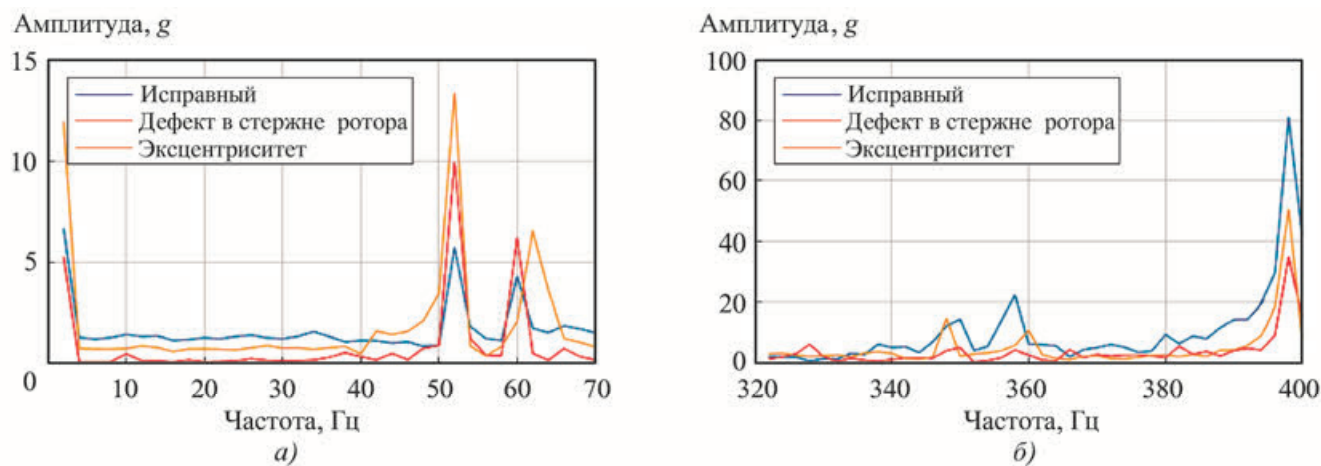


Рис. 4. Отрезки Фурье-спектров сигналов для рассматриваемых двигателей без нагрузки:

а – IFR_{ecc} ; *б* – IFR_{brb}

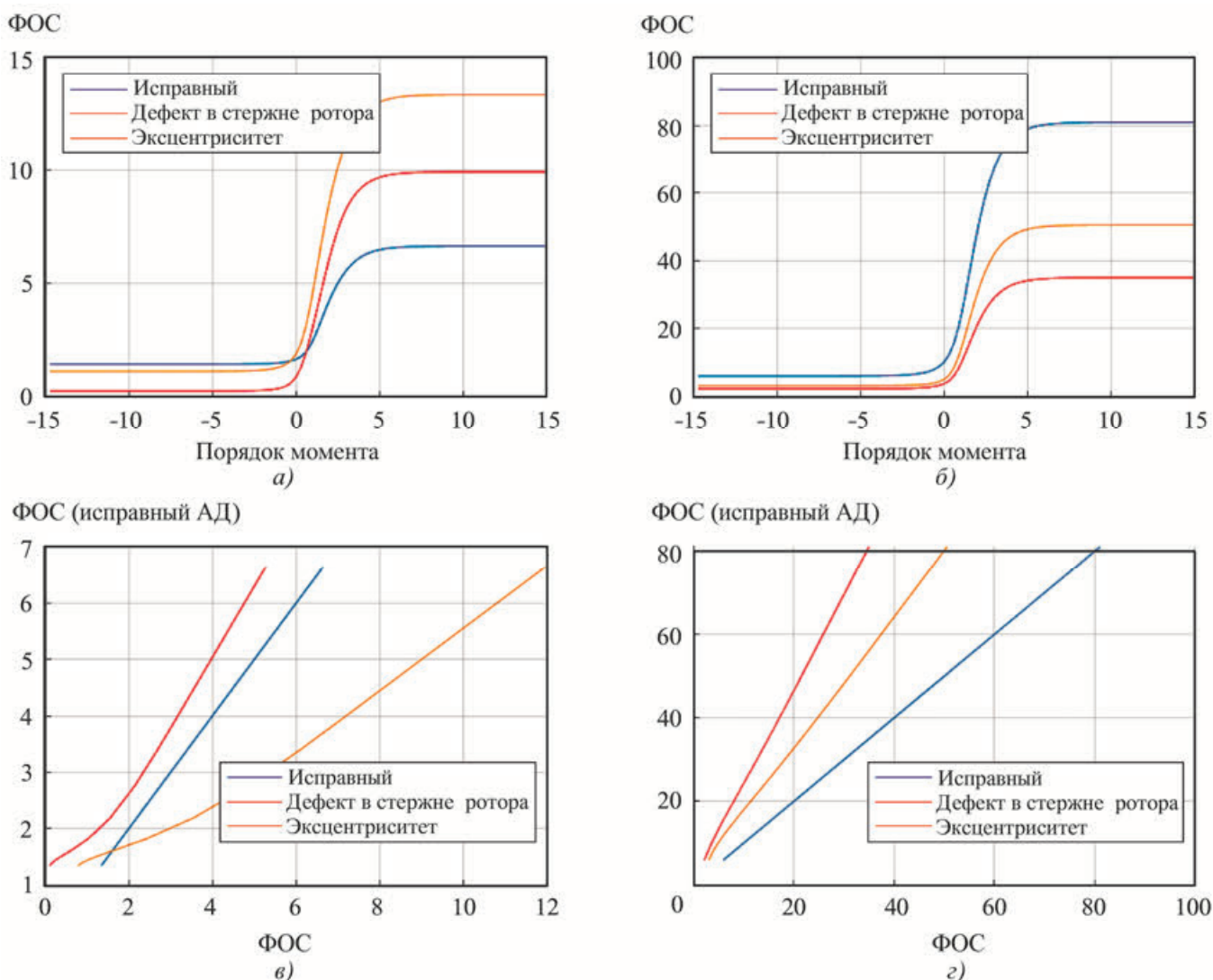


Рис. 5. ФОС спектров двигателей без нагрузки:

а, б – зависимость ФОС от порядка момента для IFR_{ecc} и IFR_{brb} соответственно; в, г – зависимость ФОС исправного двигателя от ФОС всех рассматриваемых двигателей для IFR_{ecc} и IFR_{brb} соответственно

Обнаружение неисправностей при различных уровнях нагрузки АД

В этом разделе проверяется чувствительность предлагаемого подхода к различным уровням нагрузки. Показано, что метод эффективен и воспроизводит одни и те же результаты диагностики независимо от уровня нагрузки. Для исправных и неисправных двигателей рассматриваются различные уровни постоянной нагрузки: без нагрузки, 50 и 75 % от номинальной нагрузки.

Для анализа воспроизводимости подхода исходные данные были поделены на 200 независимых и непересекающихся частей, которые подвергались обработке предложенным методом отдельно и независимо, аналогично тому, как это было сделано в предыдущем разделе. После обработки данных предложенным методом получены значения накло-

нов ФОС для рассматриваемых типов двигателей при различных уровнях нагрузки. Наклоны рассчитывали относительно ФОС, полученной для исправного двигателя без нагрузки. Полученные наклоны для различных ИЧД представлены на рис. 6, а – для IFR_{ecc} , б – для IFR_{brb} .

На рис. 6, а видно, что наклоны ФОС, полученные на исправном двигателе (голубые кривые), не пересекаются с наклонами, полученными на двигателе с эксцентриситетом (желтые кривые), и их можно отличить между собой. Однако в данном случае наклоны, полученные на двигателе с дефектом в стержне ротора (красные кривые), неразличимы. Напротив, на рис. 6, б наклоны ФОС, полученные на исправном двигателе, не пересекаются с наклонами, полученными на двигателе с дефектом в стержне ротора, и их можно отличить между собой.

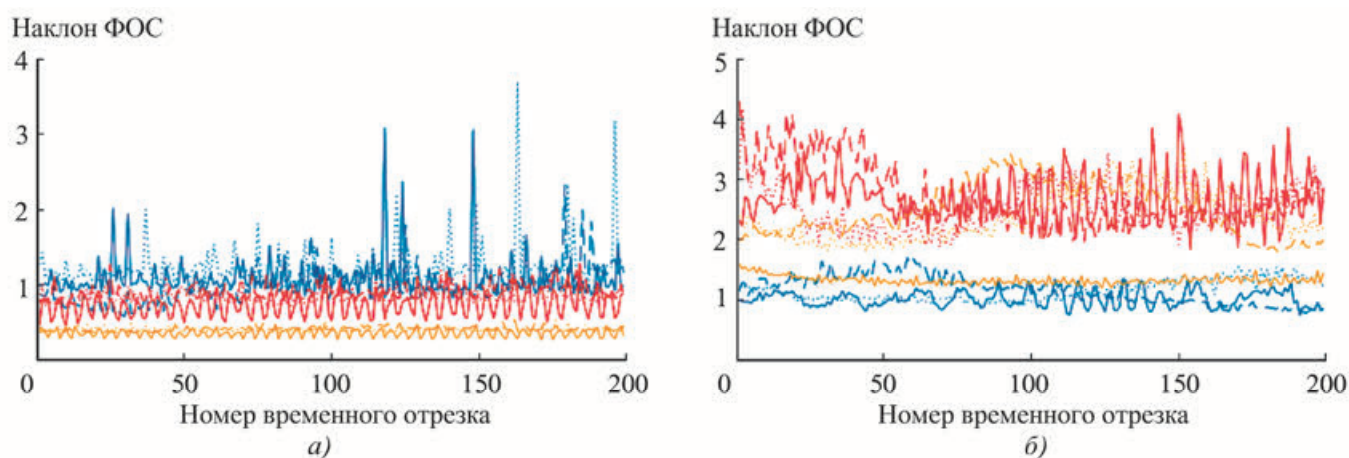


Рис. 6. Наклон ФОС IFR_{ecc} (а), IFR_{brb} (б) исследуемых двигателей при различных уровнях нагрузки:

голубые кривые – исправный двигатель; красные – двигатель с дефектом в стержне ротора; желтые – двигатель с эксцентриситетом; сплошные кривые – измерения без нагрузки; штриховые – измерения при 50%-ной нагрузке; пунктирные – измерения при 75%-ной нагрузке

3. Статистические параметры наклонов ФОС

Тип АД	Значение наклона ФОС					
	среднее		максимальное		минимальное	
	IFR_{ecc}	IFR_{brb}	IFR_{ecc}	IFR_{brb}	IFR_{ecc}	IFR_{brb}
Исправный	1,10	1,11	3,72	1,71	0,57	0,74
Дефект в стержне ротора	0,83	2,63	1,29	4,30	0,46	1,96
Эксцентриситет	0,39	2,07	0,54	3,53	0,26	1,20

Таким образом, анализируя два ИЧД, можно различать и идентифицировать исправный двигатель, двигатель с эксцентриситетом и двигатель с дефектом в стержне ротора.

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 рассмотренных АД, при всех рассмотренных уровнях нагрузки, представлены в табл. 3. Данная таблица может быть использована для принятия решений о техническом состоянии АД.

Заключение

В работе предложен метод обработки вибросигналов 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 рассматриваемые неисправности – эксцентриситет и дефект в стержне ротора независимо от уровня нагрузки. К тому же данный метод может использоваться при любом уровне нагрузки и не требует ввода дополнительной информации о скольжении двигателя или частоте вращения ротора.

Еще одним преимуществом предложенного подхода является то, что необходимая выборка имеет очень малую длину, а именно 0,5 с. Кроме того, объем данных, хранящихся для анализа, также мал, поскольку используется децимация. Таким образом, общее число отсчетов, используемых для анализа (т.е. количество тех отсчетов, которые необходимо хранить при выполнении обработки), – 500. Количество вычислений значительно сокращено по сравнению с методом, представленным в работе [16], поскольку для анализа используется отрезок фурье-спектра, определяемый ИЧД.

Невысокие требования к объему памяти и вычислительным затратам позволяют применить предложенный подход во встраиваемых системах для мониторинга технического состояния АД.

Приложение. Характеристики лабораторного оборудования

Асинхронный двигатель – трехфазный АД Siemens UD 1010/71980410-10 с соединением звездой и номинальными характеристиками: мощность – 1,5 кВт; частота – 50 Гц; напряжение – 300 В; ток – 3,25 А; скорость – 2860 об./мин.

Асинхронная машина с постоянными магнитами ABB MS4839N4008E43C10 с номинальными характеристиками: ток – 14,4 А; удерживающий момент – 15,5 Н·м; мощность – 4,9 кВт; частота – 200 Гц; скорость – 3000 об./мин.

Библиографический список

1. Waide P., Brunner C. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems // IEA Energy Papers. 2011. No. 7.
2. Сарапулов Ю. В., Сидоров В. А., Сушко А. Е., Хасанов Р. А. Прогнозирование изменений технического состояния подшипника качения по значениям виброускорения // Контроль. Диагностика. 2020. № 10. С. 12 – 19.
3. Зубренков Б. И., Маслов К. Г. Частотная вибродиагностика асинхронных двигателей шпиндельного исполнения на подшипниках качения // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. 2009. Т. 108, № 1. С. 19 – 24.
4. Лукьянов А. В., Мухачев Ю. С., Бельский И. О. Исследование комплекса параметров вибрации и внешнего магнитного поля в задачах диагностики асинхронных электродвигателей // Системы. Методы. Технологии. 2014. Т. 22, № 2. С. 61 – 69.
5. Güçlü S., Ünsal A., Ebeoğlu M. Vibration Analysis of Induction Motors with Unbalanced Loads // 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). 2017. P. 365 – 369.
6. Калинов А. П., Браташ О. В. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2012. Т. 5. С. 43 – 51.
7. Кан Ш., Микулович А. В., Микулович В. И. Спектральный анализ огибающей высокочастотных составляющих сложных сигналов на основе эмпирической декомпозиции мод и преобразования Гильберта // Информатика. 2010. Т. 28, № 4. С. 16 – 24.
8. Delgado-Arredondo P. A., Morinigo-Sotelo D., Osornio-Rios R. A., et al. Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. V. 83. P. 568 – 589.
9. Кан Ш., Микулович А. В., Микулович В. И. Вибрационная диагностика подшипников качения на основе эмпирической декомпозиции мод и машин на опорных векторах // Контроль. Диагностика. 2010. № 12. С. 26 – 35.
10. Кан Ш., Микулович В. И. Применение методов EMD для удаления шумов в вибрационных сигналах // Информационные системы и технологии (IST' 2009): материалы V Международной конференции-форума (Минск, 16 – 17 ноября 2009 г.): в 2 ч. Минск, 2009. Ч. 2. С. 139 – 142.
11. Кан Ш., Микулович В. И. Анализ вибрационных сигналов машин с применением эмпирического метода декомпозиции // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2010. № 3. С. 41 – 46.
12. Ахметханов Р. С., Дубинин Е. Ф., Кукова В. И. Метод кластеризации диагностических данных при вибродиагностике технических систем // Вестник научно-технического развития. 2017. Т. 117, № 5. С. 3 – 16.
13. Асламов Ю. П., Давыдов И. Г. Вейвлет-функция для диагностики подшипников качения // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. 2018. № 11. С. 15 – 23.
14. Bellini A., Filippetti F., Tassoni C., Capolino G. Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines // IEEE Transactions On Industrial Electronics. 2008. V. 55, No. 12. P. 4109 – 4126.
15. Jung J., Lee J., Kwon B. Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006. V. 53, No. 6. P. 1842 – 1852.
16. Morozov A. L., Nigmatullin R. R., Lino P. et al. 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). 2018. P. 386 – 391.
17. Nigmatullin R. R. The statistics of the fractional moments: Is there any chance to “read quantitatively” any randomness? // Journal of Signal Processing. 2006. V. 86. P. 2529 – 2547.
18. Nigmatullin R. R., Ceglie C., Maione G., Striccoli D. Reduced fractional modeling of 3D video streams: the FERMA approach // Nonlinear Dynamics. 2015. V. 80, No. 4. P. 1869 – 1882.
19. Nigmatullin R. R., Smith G. The generalized mean value function approach: A new statistical tool for the detection of weak signals in spectroscopy // Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. V. 38, No. 2. P. 328 – 337.
20. Kanović Ž., Matić D., Jeličić Z., et al. Induction Motor Broken Rotor Bar Detection Using Vibration Analysis. A Case Study. International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). 2013. P. 118 – 122.

References

1. Waide P., Brunner C. (2011). *Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems*, (7). IEA Energy Papers.
2. Sarapulov Yu. V., Sidorov V. A., Sushko A. E., Hasanov R. A. (2020). Predicting changes in the technical condition of a rolling bearing based on vibration acceleration values. *Kontrol'. Diagnostika*, (10), pp. 12 – 19. [in Russian language] DOI: 10.14489/td.2020.10.pp.012-019
3. Zubrenkov B. I., Maslov K. G. (2009). Frequency vibration diagnostics of asynchronous motors of spindle design on rolling bearings. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIEM, Vol. 108*, (1), pp. 19 – 24. [in Russian language]
4. Luk'yanov A. V., Muhachev Yu. S., Bel'skiy I. O. (2014). Investigation of the complex of parameters of vibration and external magnetic field in the problems of diagnos-

tics of asynchronous electric motors. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, Vol. 22, (2), pp. 61 – 69. [in Russian language]

5. Güçlü S., Ünsal A., Ebeoğlu M. (2017). *Vibration Analysis of Induction Motors with Unbalanced Loads*. 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), pp. 365 – 369.

6. Kalinov A. P., Bratash O. V. (2012). Analysis of methods for vibration diagnostics of asynchronous motors. *Energetika. Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG*, Vol. 5, pp. 43 – 51. [in Russian language]

7. Kan Sh., Mikulovich A. V., Mikulovich V. I. (2010). Spectral analysis of the envelope of high-frequency components of complex signals based on empirical mode decomposition and Hilbert transform. *Informatika*, Vol. 28, (4), pp. 16 – 24. [in Russian language]

8. Delgado-Arredondo P. A., Morinigo-Sotelo D., Osornio-Rios R. A. et al. (2017). Methodology for fault detection in induction motors via sound and vibration signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 83, pp. 568 – 589.

9. Kan Sh., Mikulovich A. V., Mikulovich V. I. (2010). Vibration diagnostics of rolling bearings based on empirical decomposition of modes and machines on support vectors. *Kontrol'. Diagnostika*, (12), pp. 26 – 35. [in Russian language]

10. Kan Sh., Mikulovich V. I. (2009). *Applying EMD Techniques to Remove Noise in Vibration Signals*. Information Systems and Technologies (IST '2009): Proceedings of the V International Conference-Forum: in 2 parts. Part 2, pp. 139 – 142. Minsk. [in Russian language]

11. Kan Sh., Mikulovich V. I. (2010). Analysis of vibration signals of machines using the empirical decomposition method. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol'*, (3), pp. 41 – 46. [in Russian language]

12. Ahmethanov R. S., Dubinin E. F., Kuksova V. I. (2017). Method of clustering diagnostic data for vibration

diagnostics of technical systems. *Vestnik nauchno-tehnicheskogo razvitiya*, Vol. 117, (5), pp. 3 – 16. [in Russian language]

13. Aslamov Yu. P., Davydov I. G. (2018). Wavelet function for rolling bearing diagnostics. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye nauki*, (11), pp. 15 – 23. [in Russian language]

14. Bellini A., Filippetti F., Tassoni C., Capolino G. (2008). Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 55, (12), pp. 4109 – 4126.

15. Jung J., Lee J., Kwon B. (2006). Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, (6), pp. 1842 – 1852.

16. Morozov A. L., Nigmatullin R. R., Lino P. et al. (2018). *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.

17. Nigmatullin R. R. (2006). The statistics of the fractional moments: Is there any chance to “read quantitatively” any randomness? *Journal of Signal Processing*, Vol. 86, pp. 2529 – 2547.

18. Nigmatullin R. R., Ceglie C., Maione G., Striccoli D. (2015). Reduced fractional modeling of 3D video streams: the FERMA approach. *Nonlinear Dynamics*, Vol. 80, (4), pp. 1869 – 1882.

19. Nigmatullin R. R., Smith G. (2005). The generalized mean value function approach: A new statistical tool for the detection of weak signals in spectroscopy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 38, (2), pp. 328 – 337.

20. Kanović Ž., Matić D., Jeličić Z. et al. (2013). *Induction Motor Broken Rotor Bar Detection Using Vibration Analysis. A Case Study*. International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), pp. 118 – 122.

Для цитирования статьи:

Морозов А. Л. Комбинированный метод обработки вибросигналов для диагностики и контроля асинхронных двигателей, оптимизированный для встраиваемых систем // *Контроль. Диагностика*. 2021. Т. 24, № 10. С. 18 – 27. DOI 10.14489/td.2021.10.pp.018-027

Morozov A. L. (2021). Combined vibration signal processing for diagnostics and monitoring of induction motors optimized for embedded systems. *Kontrol'. Diagnostika*, Vol. 24, (10), pp. 18 – 27. [in Russian language]. DOI 10.14489/td.2021.10.pp.018-027