

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ПРЕДАВАРИЙНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В РАБОТЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Введение. Повышение качества и надежности электрических машин, продление срока их эксплуатации – одна из наиболее актуальных проблем современного электропривода [1].

На горнодобывающих, металлургических предприятиях электрические машины – синхронные двигатели работают в тяжелых условиях: обилие пыли, повышенная влажность, высокая температура окружающей среды и часто повторяющаяся максимальная нагрузка. Такие специфические условия эксплуатации приводят к тому, что аварийный выход из строя электродвигателей составляет около 30%. Это свидетельствует о недостаточной качестве используемых систем защит электродвигателей и необходимости внедрения защит, позволяющих вывести машину в ремонт с минимальным экономическим ущербом.

Анализ предыдущих исследований. В процессе эксплуатации электрической машины возможны неисправности, приводящие к авариям. Результаты исследований [1-9] актуальны сейчас, когда в промышленности изношенность машинного парка доходит до технически возможного предела. Авторы выделяют следующие причины, приводящие к авариям:

- пробой обмотки на корпус;
- пробой обмотки между фазами;
- межвитковое замыкание в статоре и роторе;
- обрыв обмотки;
- обугливание обмоток электродвигателей;
- пробой контактных колец на корпус и между фазами;
- распайка хомутиков и пробой ротора на бандажи;
- выпучивание лобовых частей обмотки фазного ротора и разрыв бандажей;
- механическая вибрация электродвигателя;
- вибрации электромагнитного характера;
- витковые замыкания;
- повреждения подшипников и подпятников;
- температурный перегрев и др.

Проведенный анализ возможных причин аварийного выхода из строя электродвигателей требует рассмотрения возможных и используемых методов защиты синхронных двигателей:

- контроль изоляции. Существуют различные методы контроля сопротивления изоляции обмотки статора относительно земли: искусственное смещение нейтрали статорной обмотки; использование третьих гармоник нулевой последовательности; метод наложения переменного тока; метод наложения постоянного тока;
- защита от междуфазных замыканий. Для защиты синхронных двигателей от междуфазных повреждений применяются токовые защиты, действующие на отключение двигателя без выдержки времени: токовая отсечка и продольная дифференциальная защита;
- защита от однофазных замыканий на корпус;
- защита от двойных замыканий на землю;
- защита от работы двигателя в асинхронном режиме. Предусматриваются следующие варианты выполнения защиты от работы в асинхронном режиме: при помощи реле, реагирующего на увеличение тока в обмотках статора; с помощью устройства, реагирующего на наличие переменного тока в цепи обмотки ротора или на сдвиг фаз между током и напряжением статора при асинхронном режиме; с помощью устройства, действующего на принципе отсчета числа электрических поворотов ротора при асинхронном режиме;
- защита от перегрузки: в соответствии с ПУЭ защита от перегрузки должна предусматриваться на электродвигателях, подверженных перегрузке по технологическим причинам, и на электродвигателях с особо тяжелыми условиями пуска и самозапуска, перегрузка которых возможна при чрезмерном увеличении длительности пускового периода вследствие повышенной нагрузки, или понижении напряжения сети;
- минимальная защита напряжения и частоты;
- защита от второго замыкания на землю в цепи возбуждения.

Современные защиты срабатывают не на основании анализа процесса развития предаварийных изменений в функционировании узлов и систем, а по факту совершения события. Создание защит интеллектуального уровня, т.е. защит, обеспечивающих контроль параметров, сопоставление, анализ, принятие решений с учетом предыстории поведения агрегата, питающей сети, а также устройств контроля – направление научных исследований в данном направлении. Масштабность этой задачи представляется очень важной. В действительности, создание таких систем возможно с использованием небольшого числа датчиков, контролирующих мгновенные

значения параметров, микропроцессорных устройств для обработки информации, хранения результатов измерений в периоды до и после развития события. Если и есть сложности решения этой задачи, то они не в технических возможностях, а в математической формализации явлений и их программном представлении.

В контексте данных задач следует отметить, что, по сути, речь идет о диагностических методах, позволяющих определить процесс развития предаварийных изменений в работе СД.

Методы диагностики двигателей, в основном, основаны на диагностике какого-либо сигнала или группы сигналов, получаемых с контрольно-измерительных приборов и датчиков. Существующие спектральные методы диагностики сигнала хорошо подходят для выявления особенностей в достаточно большом классе задач, однако, они становятся почти бесполезными, когда изучаемый сигнал имеет быстроменяющуюся составляющую на отдельных важных участках. Это происходит из-за того, что все они используют метод Фурье преобразования для построения спектра изучаемого сигнала.

Метод вейвлет-анализа, как отмечено в [10], оказался намного более универсальным методом анализа изменяющихся во времени физических сигналов, поскольку он дает очень точную спектральную картину и при этом учитывается распределение сигнала по физической координате, например, по времени или пространству. Это достигается за счет того, что используемые базисные функции разложения (вейвлеты) сильно локализованы в пространстве. Вейвлет-преобразование позволяет: локализовать особые точки; проанализировать частотную и амплитудную изменчивость сигнала; выявить нерегулярные выбросы функции и ее производных; вычислить фрактальные характеристики сигнала.

В [11] указан метод диагностики, позволяющий определить зарождение неполадок в работе газотурбинного двигателя всего лишь за 10 мс до возникновения критических режимов работы. Данный метод основывается на применении вейвлет-анализа.

Теория вейвлет-преобразования изложена в [11-16]. Отметим, что одна из главных идей вейвлет-преобразования заключается в представлении сигналов на различных уровнях декомпозиции (разложения), т.е. в разделении функций приближения к сигналу на две группы: аппроксимирующую - грубую, с достаточно медленной временной динамикой изменений, и детализирующую - с локальной и быстрой динамикой изменений на фоне плавной динамики, с последующим их дроблением и детализацией на других уровнях декомпозиции сигналов. Это возможно как во временной, так и в частотной областях представления сигналов вейвлетами.

Цель работы. Анализ процесса развития предаварийных изменений в работе СД на основе вейвлет-преобразований.

Материал и результаты исследований. Анализ критериев и методов, предназначенных для защиты синхронных двигателей и воплощенных в существующие устройства защиты с учетом тяжелых условий эксплуатации, позволяет говорить о том, что реализация целой группы возможных и используемых методов для своевременной защиты связана с рядом трудностей. Например, характерным явлением для СД агрегатов Г-Д карьерных экскаваторов является расплавление или просто нарушение контакта мест соединения полюсных дуг демпферной (пусковой) обмотки. При понижениях напряжения, совпадающих с большими нагрузками на валу подъемных электродвигателей и, следовательно, приводного СД, происходит его раскачка и выпадение из синхронизма, что приводит к большим токам в демпферной и статорной обмотках. Причинами этого отказа является отсутствие форсировки тока возбуждения при понижении напряжения сети, низкое быстродействие САР электроприводов подъема и напора и относительно высокое реактивное сопротивление карьерных сетей 6 кВ, что ведет к понижению напряжения от пуска мощных соседних двигателей.

Защита приводного СД экскаватора осуществляется максимально-токовой защитой (МТЗ) с настройкой токовых реле на $(1,7 \dots 2,2)I_n$. Это должно являться достаточной мерой предотвращения развития аварийной ситуации при выпадении СД из синхронизма. Вместе с тем, при анализе степени защищенности СД и работоспособности систем защит, нельзя не принимать во внимание, что при прямом асинхронном пуске имеющиеся системы защит шунтируются из-за большой величины пускового тока до 1500 А. Присутствие шунтирующей релейно-контакторной аппаратуры приводит к снижению надежности работы МТЗ и других имеющихся систем защит.

В этой связи, эффективной мерой проверки работоспособности защит СД, является разработка специальных систем их диагностики. Оснащение экскаваторов системами косвенного пуска с регулируемым преобразователями напряжения (ПН) [17] позволяет решить эту задачу и найти новые возможности проверки работоспособности защит СД.

Суть этих новых функциональных возможностей заключается в том, что, осуществив косвенный пуск и подключив СД к сети, система косвенного пуска не отключается, а переводится в режим диагностики защиты. Средствами ПН питающего якорь или изменением тока в обмотке возбуждения генератора постоянного тока (ГПТ), последний поочередно переходит из двигательного режима работы в генераторный, а изменения скорости создают переменный момент нагрузки на валу работающего СД [2] (рис.1). Такая система позволяет инициировать процесс развития аварийных изменений в работе двигателя и при этом анализировать работу защитных систем.

Под действием внешнего момента, приложенного к валу СД со стороны генератора, возникают колебания ротора синхронного двигателя. Создаваемые вынужденные колебания, налагаясь на собственные свободные колебания СД, могут создавать резонанс, что приводит к кратковременному выпадению СД из синхронизма (проскальзыванию на один полюс). Бросок тока при выпадении из синхронизма должен привести в действие

системы защит СД, отключающие двигатель.

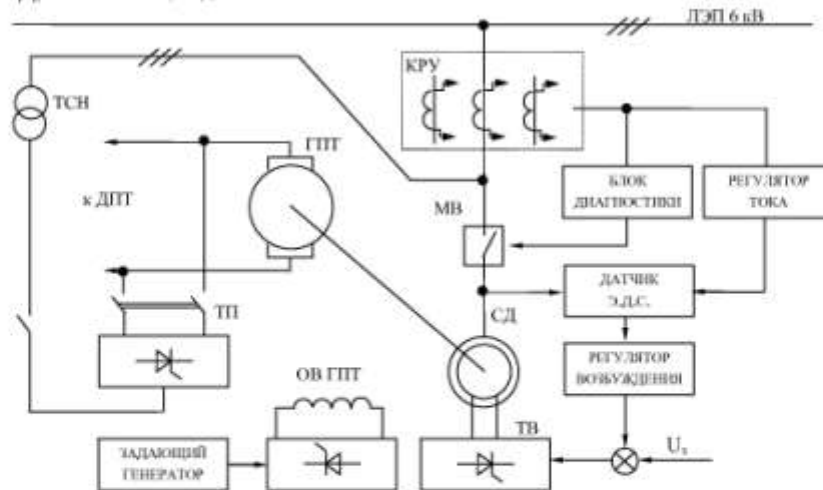


Рис. 1 – Функциональная схема системы проверки работоспособности защит

Для развития резонансных колебаний при периодической нагрузке СД, необходимо выполнение условия резонанса [18]:

$$\frac{T_d}{2} = (2k+1)\frac{T_k}{2}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

где T_d и T_k - период вынужденных и собственных колебаний, причем $T_k = \sqrt{\frac{H_j}{M_s}}$, H_j - инерционная постоянная времени СД, M_s - синхронизирующий момент.

На величину синхронизирующего момента M_s , удерживающего двигатель в синхронизме, влияет величина ЭДС возбуждения (E_f). Увеличение ЭДС приводит к повышению предела устойчивости и двигатель может остаться в синхронизме даже при выполнении условия развития резонанса (1). С этой целью, для получения положительного результата, в систему управления введена обратная связь по ЭДС, и уровень возбуждения регулируется таким образом, чтобы достигнуть предела устойчивости. Ток при нагрузке, соответствующей пределу устойчивости [19]:

$$I_{kp} = \frac{1}{x_d} \sqrt{k_1^2 (k + x_d)} \approx \frac{E_f}{x_d}, \quad (2)$$

где k - коэффициент насыщения в точке характеристики холостого хода ($k \approx 1,15$); k_1 - коэффициент, зависящий от $\cos(\varphi)$ (при $\cos(\varphi) = 0,8$, $k_1 \approx 1$).

На рис.2 приведены машинограммы развития колебательного процесса и выпадение из синхронизма двигателя СДН-2-16-74, СД экскаватора ЭШ15/90 При частоте собственных колебаний $f_k = 0,5$ Гц возникающий периодический резонансный ток, при выпадении из синхронизма, достигает величины $(2..2,5)I_n$.

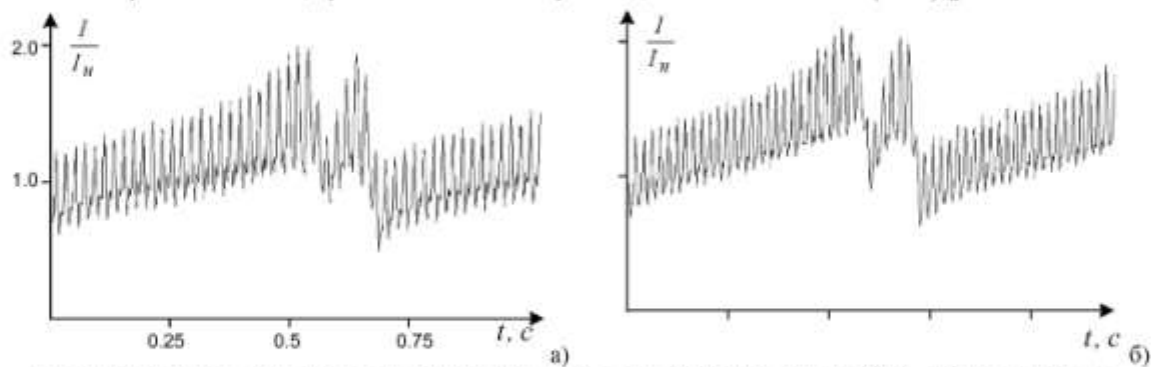


Рис. 2 – Изменение тока статора при испытании защит с воздействием с частотой: а) - 1,5 Гц, б) - 3,5 Гц

С точки зрения анализа развития предаварийных изменений в работе СД необходимо говорить о выделении и получении информативных и устойчивых признаков, характеризующих текущий режим его работы. Такие признаки могут быть получены на основе использования полученных в результате вейвлет-преобразования ко-

эффицентив. Именнo представлениe исходного сигнала в виде вектора признаков, полученного на основе набора коэффициентов вейвлет-преобразования, можно рассматривать как показатели, характеризующие изменение динамики текущего режима работы двигателя.

Для анализа сигналов (рис. 2) возможно применение как непрерывного (НВП) так и дискретного (ДВП) вейвлет-преобразования. Однако последнее предоставляет более широкие возможности [15]. Главным достоинством ДВП является наличие эффективных алгоритмов быстрого вейвлет-преобразования (БВП). Благодаря этому появляется возможность анализа больших выборок за вполне приемлемое для практических целей время, что позволяет сократить временные затраты и реализовать анализ и управление в реальном масштабе времени (учитывая постоянный рост производительности микропроцессорных устройств).

Известно [11-16], что любую функцию f из $L^2(R)$ можно разложить на некотором заданном уровне разрешения m в ряд вида:

$$f(t) = \sum_k C_{m,k} \cdot \varphi_{m,k} + \sum_{m,k} D_{m,k} \cdot \psi_{m,k} \quad (3)$$

Выражение (3) показывает возможность аппроксимации любой произвольной функции $f(t)$ набором простых локальных функций $\varphi_{m,k}(t)$ и $\psi_{m,k}(t)$, ортогональных на разных уровнях значений m и полностью покрывающих пространство $L^2(R)$ за счет смещений k . Первая сумма выражения (3) дает "сглаженные средние" значения функции $f(t)$ на разных масштабных уровнях, вторая сумма вейвлетных функций добавляет к "грубой" аппроксимации сигнала все более подробные детали на все меньших масштабных интервалах. Коэффициенты $C_{m,k}$ и $D_{m,k}$ называются коэффициентами аппроксимации и детализации соответственно [11-16]. На практике значения коэффициентов определяются с помощью БВП.

Разложение сигнала на сумму аппроксимирующих и детализирующих составляющих производится с использованием ортогональных и биортогональных вейвлетов, которые отличаются возможностью реконструкции, как локальных особенностей сигналов, так и сигналов в целом. Среди ортогональных вейвлетов можно выделить семейство вейвлетов Добеши. В практических приложениях используются только вейвлет-коэффициенты h_k и g_k без вычисления конкретной формы вейвлетов. Они вообще не имеют аналитического выражения и определяются только фильтрами: h_k и g_k - представляют собой передаточные функции односторонних согласованных цифровых фильтров, низкочастотного и высокочастотного соответственно.

Изложенные ниже эксперименты и их анализ выполнены на основе использования вейвлетов Добеши. Для вейвлет-разложения сигналов (рис. 2) применен вейвлет Добеши db4 с уровнем разложения $N = 5$. На рис. 3 изображены (для рис. 2б) полученные вейвлет-коэффициенты и компоненты сигнала для нахождения, которых выполнено прямое восстановление отдельно по каждому набору детализирующих коэффициентов.

Имеется визуальная разница графиков, как детализирующих коэффициентов, так и восстановленных компонент сигнала. Следует отметить, что компоненты исследуемого сигнала, которые соответствуют найденным вейвлет-коэффициентам, отражают его характеристики на определенных частотах и также могут быть использованы для задач диагностики.

Для формирования набора (векторов) признаков предполагается, что при нормальном (штатном) режиме работы двигателя «энергия» вейвлет-коэффициентов, соответствующих каждому уровню, сохраняется. Но когда происходит явление, способное вызвать событие (в данном случае - выпадение СД из синхронизма), происходит качественное изменение пространственных свойств переменных состояния двигателя, и «энергия» вейвлет-коэффициентов начинается изменяться как по уровням, так и перераспределяться между различными уровнями детализации.

Для проверки выдвинутого предположения вейвлет-преобразованию (с вейвлетами Добеши db4) и уровнем разложения $N=7$ подвергались сигналы (рис. 2), которые предварительно были разбиты на частичные временные интервалы (равной длины), итерационно с присоединением каждого последующего интервала к предыдущему.

По полученным вейвлет-коэффициентам были вычислены их статистические характеристики на каждом уровне разложения для всех итераций. В качестве «энергии» использовалось среднеквадратичное отклонение (СКО) вейвлет-коэффициентов на каждом уровне детализации. На рис. 4 в виде диаграммы представлены значения СКО вейвлет-коэффициентов по уровням разложения ($N = 7$) для 5 частичных временных интервалов сигналов рис. 2.

Из рис. 4 видно, что на 4-м и 3-м частичных временных интервалах исследуемых сигналов (рис. 2) СКО вейвлет-коэффициентов значительно начинают различаться по уровням. Поэтому они имеют диагностическую значимость. В качестве признаков используется доля «энергии», сосредоточенная в вейвлет-коэффициентах определенного масштаба, т.е. $a_i = \frac{CKO_i}{\sum_j CKO_j}$, где CKO_i - СКО вейвлет-коэффициентов, соответствующих определенному уровню разложения. На рис. 4 расчетные признаки изображены в виде ломаной.

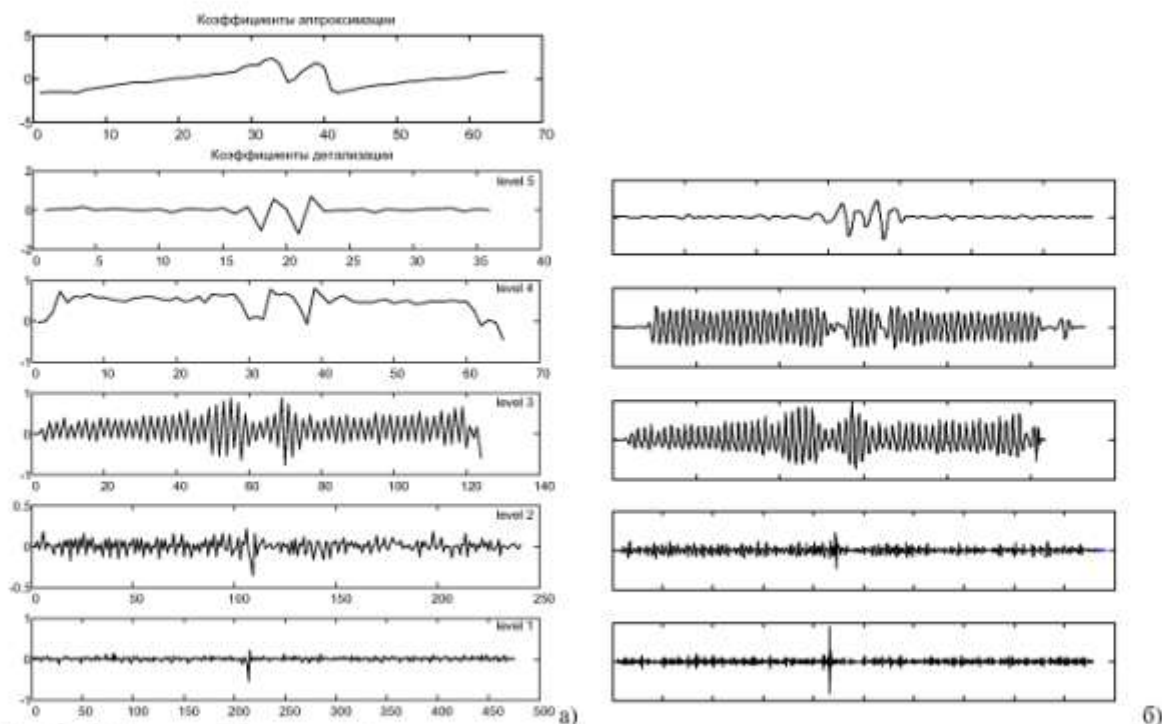


Рис. 3 – Вейвлет-коэффициенты (а) и восстановленные для каждого уровня разложения компоненты сигнала (б)

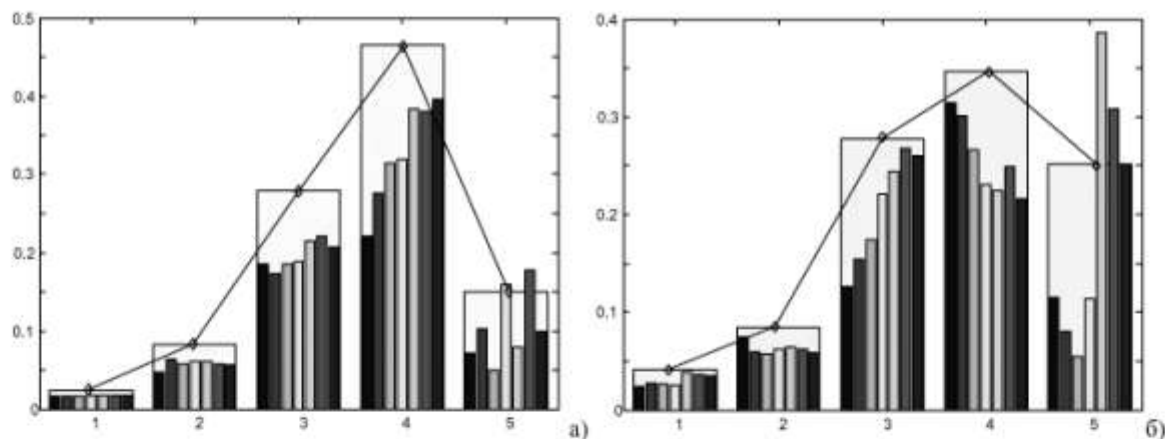


Рис. 4 – Диаграммы СКО вейвлет-коэффициентов по уровням разложения для временных интервалов сигнала

Кроме анализа детализирующих вейвлет-коэффициентов анализировались, как признаки, непосредственно сами аппроксимирующие коэффициенты, соответствующие усреднению исследуемого сигнала. Учитывая суть аппроксимирующих коэффициентов, описанная выше методика была незначительно упрощена. А именно использовались ДВП с вейвлетами Добеши db1 и уровнем разложения $N = 7$. На рис. 5 представлены изменения приведенных аппроксимирующих коэффициентов на 7-м уровне. Приведение коэффициентов осуществлялось нормированием по максимальному коэффициенту на каждом временном интервале.

Анализ полученных результатов (рис.4, 5) показывает, что в стационарном режиме характер изменения аппроксимирующих коэффициентов линейный, а их значения близки к «1» (рис. 5). Нарушение стационарности: появление колебаний, низкочастотных трендов приводит к изменению значений показателя a_i и аппроксимирующих коэффициентов, но линейный характер их изменения сохраняется. По мере развития предаварийных изменений – приближения к точке выпадения СД из синхронизма – линейный характер показателя a_i и аппроксимирующих коэффициентов изменяется на нелинейный и приближается к кубическому закону.

Соответственно, из каждого сигнала выделяется ряд признаков, которые описывают его пространственные свойства. Подчеркнем, что в качестве формируемых параметров могут использоваться и другие признаки самой разной природы, однако, сравнительный анализ результатов использования различных способов формирования

признаков лежит за рамками данной статьи.

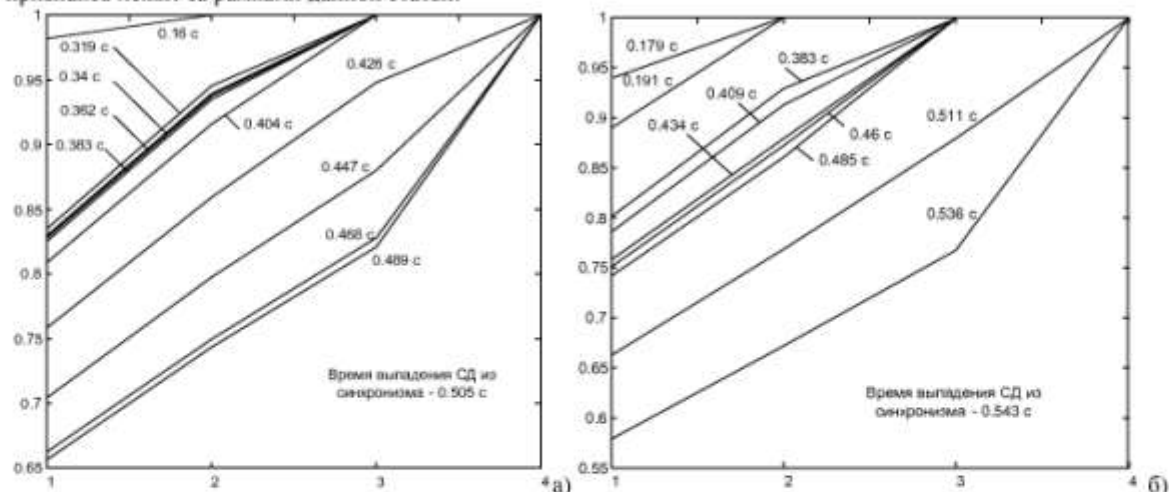


Рисунок 5 – Изменение приведенных аппроксимирующих коэффициентов на 7-м уровне:
а) – сигнала рис.2,а; б) – сигнала рис.2,б

Выводы. Полученные результаты дают основания предполагать, что описанный подход на основе вейвлет-преобразования может быть успешно применен для выделения информативных признаков процесса развития предаварийных изменений в работе СД. Критерием же информативности и устойчивости, выделяемых таким способом признаков могут служить результаты их применения для решения практической задачи – раннего выявления развития предаварийных изменений в работе СД и своевременного реагирования на них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ермолин Н.П., Жерихин И.П. Надежность электрических машин, М., "Энергия", 1975.-250с.
2. Котеленец Н.Ф., Кузнецов Н.Л. Испытания и надежность электрических машин, М., "Высш.шк.", 1988.-232с.
3. Слодарж М.И. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. М. "Энергия" 1977.-213с.
4. Гемке Р.Г. Неисправности ЭМ. Л., Энергоатомиздат, 1989.- 235с.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей/Под ред. Л.Г. Мамиконяца. – 4-е изд., М., Энергоатомиздат., 1984.-240с.
6. Шенфельд Р., Хабигер Э. Автоматизированные электроприводы, Л., Энергоатомиздат, 1985, -464с.
7. Глебов И.А., Логинов С.И. Системы возбуждения и регулирования синхронных двигателей. Л., "Энергия", 1972.-111с.
8. Петелин Д.П. Автоматическое управление синхронными электроприводами, М., "Энергия", 1968.-192с.
9. Бойко В.С., Лашко Ю.В., Черный А.П., Живора В.Ф. Об уровнях и путях совершенствования защит высоковольтных синхронных двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: наукові праці КДПУ.- Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип.2(19), Т2. – С. 205-210.
10. М. Хасанов, Р. Якупов, В. Ямалиев, «Вейвлет-анализ в задаче диагностирования нефтепромышленного оборудования» //Вестник инженерингового центра ЮКОС, №2, 3 квартал 2001г., с.22-25.
11. Дремин И., Иванов О., Нечитайло В. Вейвлеты и их использование. - Успехи физических наук, 2001, т. 171, № 5, С. 465–561.
12. Астафьева Н. Вейвлет анализ: основы теории и примеры применения. - Успехи Физических Наук, 166 (1996), № 11, С. 1145.
13. Переберин А.В. О систематизации вейвлет-преобразований. – Вычислительные методы и программирование, 2001, т.2.
14. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. – СПб, ВУС, 1999. 204 с.
15. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. М.: LVR Пресс, 2005. – 304 с.
16. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Пер. с англ. под ред. Я.М.Жилейкина. М.: Мир, 2001, 412 с.
17. Черный А.П., Гладырь А.И., и др. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография – Кременчук: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280 с.
18. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, Ленингр. от-ние, 1980. -256 с.
19. Лютер Р.А. Расчет синхронных машин. Л.: Энергия, Ленингр. от-ние, 1979. -272 с.