

ротора соответственно синхронной или асинхронной машин.

3. Полученные аналитические выражения позволяют относительно просто и с достаточной точностью провести анализ временных функций, первых и высших гармоник электромагнитных величин в установившемся режиме, облегчить переход к разным системам координат, определить добавочные потери и максимальные значения величин для правильного выбора силовых элементов вентиля преобразователя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. — М.: Госэнергоиздат, 1963.
2. Csorgits F. Die Kennlinien der untersynchroner Stromrichter-kaskade. — Period. Politechn. El. Eng, 1970, № 14.
3. Schmidt I. Szinkronmotor frekvenciavaltos uzeme edyszeru aramiranyitokkal. — Elektrotechnika, 1974, № 10–11.

4. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Вентильные каскады и двигатели двойного питания. — М.: Энергия, 1979.

5. Dement'yev Yu.N. Felvezetos szinkron feletti aszinkron motoros kaskad hajtas statikus es dinamik us vizsgalata: Kandidatusi ertekezes, Budapest, 1984.

6. Дементьев Ю.Н., Расстригин А.А. Зависимое управление роторным преобразователем в надсинхронном вентильном каскаде. — Изв. Томского политехнического университета, 2005, т. 308, № 7.

7. Дементьев Ю.Н. Математическое описание статики и динамики электропривода переменного тока с вентильными преобразователями. — Электричество, 2009, № 12.

*Автор: Дементьев Юрий Николаевич окончил факультет автоматики и электромеханики ТПИ в 1975 г. В 1984 г. защитил диссертацию «Исследование надсинхронного каскадного электропривода в статическом и динамическом режимах» в Техническом университете, г. Будапешт (Венгрия) и получил степень Ph.D. В 1985 г. получил степень кандидата технических наук. Доцент, заведующий кафедрой электропривода и электрооборудования ТПУ.*

\* \* \*

## Функциональная вейвлет-диагностика состояния обмоток роторов трехфазных электрических машин по статорным токам

ТИМОШКИН В.В., ГЛАЗЫРИНА Т.А., ПОЛИЩУК В.И., ГЛАЗЫРИН А.С.

*Разработаны принципы построения систем функциональной вейвлет-диагностики электродвигателей. В отличие от ранее предложенных методик применяется кратномасштабный вейвлет-анализ результирующего модуля вектора тока статора. Это позволяет проводить диагностику электрической машины с использованием минимальной информации от штатных датчиков токов статора.*

**Ключевые слова:** электрические машины, вейвлеты, диагностика повреждений

Во многих производствах и прежде всего в энергетике внезапный выход из строя электрической машины (ЭМ), как правило, приводит к нарушению сложных технологических процессов. Прямые и косвенные финансовые потери при эксплуатации ЭМ с наличием дефекта довольно значительны, что и обуславливает необходимость применения функциональной диагностики состояния двигателя в процессе его работы.

Обнаружение дефектов, влияющих на ресурс ЭМ, задолго до отказа позволит не только хорошо подготовиться к ремонту, но и перейти с обслуживания и ремонта по регламенту на ремонт и обслуживание по фактическому состоянию. Для этого необходимо создать универсальные простые мето-

*The design principles of wavelet fault detection system intended for electric motors have been developed. Unlike the methods applied previously, the multiresolution wavelet analysis of resultant vector length of stator current is used. It enables to carry out the fault detection of electric machine by means of minimum information obtained from stator currents by installed sensors.*

**Key words:** electric machine, wavelets, fault detection

ды функциональной диагностики, позволяющие выявить дефект конкретной части электрооборудования, желательно при этом максимально эффективно использовать штатные измерительные средства.

С развитием современных цифровых сигнальных процессоров (Digital signal processor, DSP) для селективного выявления диагностических признаков стало возможным применение эффективных интеллектуальных математических методов обработки сигналов в реальном масштабе времени, позволяющих по совокупности информационных признаков выявлять конкретный дефект.

Для решения задач функциональной диагностики можно использовать информационные призна-

ки, полученные в результате процедуры динамической идентификации параметров и вектора состояния ЭМ на основе известных математических методов, таких как вейвлет-анализ [1, 2], фильтр Калмана [3], наблюдатель Люенбергера [4], искусственные нейронные сети [5] и т.д.

Задача исследований заключалась в выявлении диагностических признаков повреждений роторных цепей асинхронного двигателя (АД) на основе кратномасштабного вейвлет-анализа токов статора.

**Методы и средства решения задачи.** Повреждения электрических цепей ротора (обрывы стержней АД с короткозамкнутой беличьей клеткой или несимметрия фаз в АД с фазным ротором) диагностировались по статорным токам с помощью алгоритмов, представленных на рис. 1.

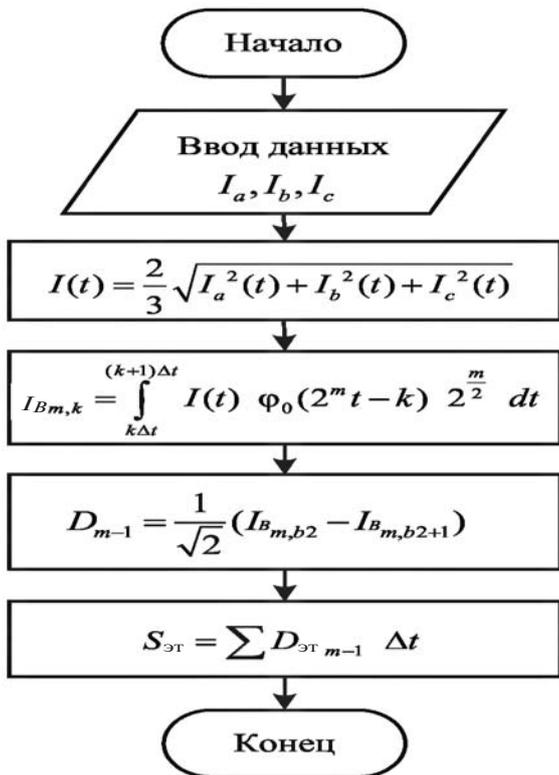
Несимметрия фаз ротора возникает при неравномерном распределении нагрузки по фазам и повреждениях фаз в АД с фазным ротором или при

повреждении стержней беличьей клетки в АД с короткозамкнутым ротором.

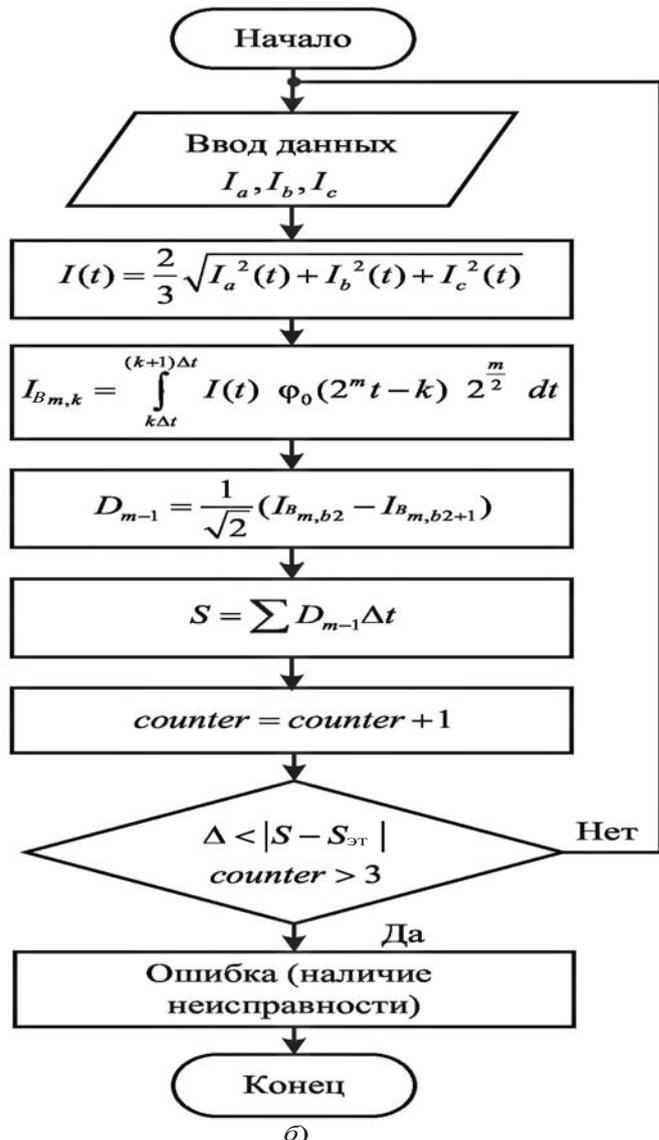
Перед началом работы диагностической системы фиксируется эталонный базовый параметр по алгоритму рис. 1,а, который соответствует нормальному режиму работы АД. С помощью датчиков тока каждой фазы статора снимаются мгновенные значения фазных токов  $I_a(t)$ ,  $I_b(t)$ ,  $I_c(t)$  и вычисляется результирующий модуль вектора тока:

$$I(t) = \frac{2}{3} \sqrt{I_a^2(t) + I_b^2(t) + I_c^2(t)}$$

Особенностью данного принципа построения диагностической системы является использование вейвлет-преобразования [1, 2] с применением кратномасштабного анализа, суть которого заключается в разложении сигнала на ортогональные и сигнальные составляющие в различных масштабах:



а)



б)

Рис. 1. Алгоритмы получения эталонного базового параметра (а) и диагностики состояния АД (б)

$$I_{A_{m,k}} = \int_0^{(k+1)Dt} I(t) j_0(2^m t - k) 2^{m/2} dt,$$

где  $m$  — уровень декомпозиции;  $k = 0, \dots, 2^m$  — число точек;  $j_{m,k}(x) = j_0(2^m t - k) 2^{m/2}$  — масштабирующая функция.

За базисную функцию для вейвлет-преобразования принимается вейвлет Хаара. Полученные вейвлет-коэффициенты разделяются на низкочастотные (грубые) и высокочастотные (детализирующие) составляющие. В качестве основного диагностического признака применялись детализирующие вейвлет-коэффициенты:

$$D_{m-1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (I_{B_{m,b2}} - I_{B_{m,b2+1}}).$$

В конце алгоритма на основе интегральной оценки вычисляется эталонное значение  $S_{\text{эт}}$ , которое затем записывается в память микроконтроллера:

$$S_{\text{эт}} = \int a D_{\text{эт}_{m-1}} Dt.$$

Принцип работы, представленный на рис. 1,б, аналогичен алгоритму рис. 1,а, но при этом вейвлет-коэффициенты вычисляются в режиме реального времени. На основе полученных данных диагностическая система сравнивает текущее состояние с ранее зафиксированным (эталонным).

Интегральная оценка упрощает процесс идентификации текущего состояния АД, так как отслеживает все амплитудные отклонения высокочастотной (детализирующей) составляющей результирующего модуля тока.

Для того чтобы диагностическая система была менее чувствительной к воздействию параметрических возмущений АД, следует сформировать зону нечувствительности, в которой фиксируется аварийная ситуация. Зона нечувствительности выбирается экспертом исходя из текущих требований, в данном случае была выбрана 5%-я зона от  $S_{\text{эт}}$  (рис. 2).

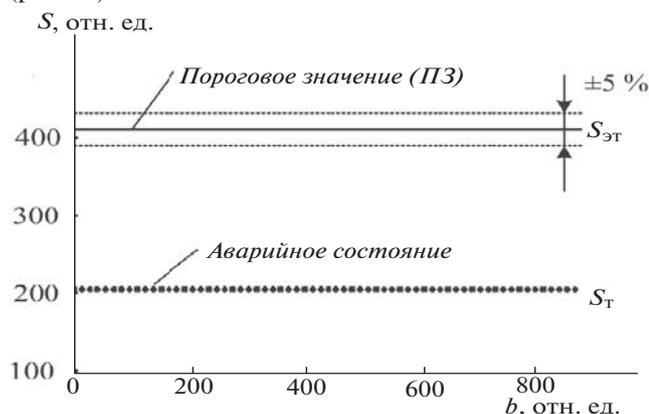


Рис. 2. Зоны работы диагностической системы

Для предотвращения ложного срабатывания используется счетчик, который фиксирует аварийное состояние после отсчета определенного числа циклов, в данном случае было выбрано три. Это позволяет бороться с наведением помех в каналах связи датчиков и другими паразитными эффектами.

Для улучшения работы диагностической системы следует сформировать «библиотеку» из вейвлет-коэффициентов, где каждому набору соответствует определенная неисправность. При формировании «библиотеки» могут возникнуть определенные сложности, связанные с тем, что вейвлет-коэффициенты, соответствующие каждой неисправности, сложно рассчитать теоретически, их можно получить только с реально действующего объекта.

**Экспериментальная проверка.** Для проверки работоспособности диагностической системы использовался асинхронный электропривод с фазным ротором. Экспериментальная установка включала сочлененные между собой и установленные на едином основании машину постоянного тока, машину переменного тока, маховик, преобразователь угловых перемещений, датчики токов статора. Для сбора и записи сигналов датчиков использовалась плата сбора данных PCI-6024E фирмы National Instruments. При программировании платы сбора данных применялся специализированный пакет, позволяющий создать визуальный интерфейс для записи измеряемых данных с датчиков.

В ходе исследования были сняты и исследованы массивы данных статорных токов в различных режимах — при пуске, набросе и сбросе нагрузки.

Несимметрия в роторной обмотке имитировалась введением добавочных сопротивлений. Значения статорных токов снимались с шагом дискретизации 0,0001 с и анализировались в секундном интервале. Из рис. 3,а и в можно видеть, что токи, полученные в аварийном режиме, имеют разные амплитудные значения в отличие от токов, снятых в нормальном состоянии.

Несимметрия проявляется также в высокочастотных вейвлет-коэффициентах (рис. 4,б и г) и низкочастотных (рис. 4,а и в), из рисунков видно, что частотные спектры в нормальном и аварийном состояниях различаются.

Обработка и анализ статорных токов проводилась с помощью стандартных библиотек математического пакета MathCAD 14. Для упрощения вычислений можно рекомендовать воспользоваться дополнительными библиотеками Signal Processing, а также Wavelet Extension.

Как показали результаты проведенных экспериментальных исследований, кратномасштабный вейвлет-анализ позволяет достоверно выявлять повреждение роторных цепей АД на основе мгновен-

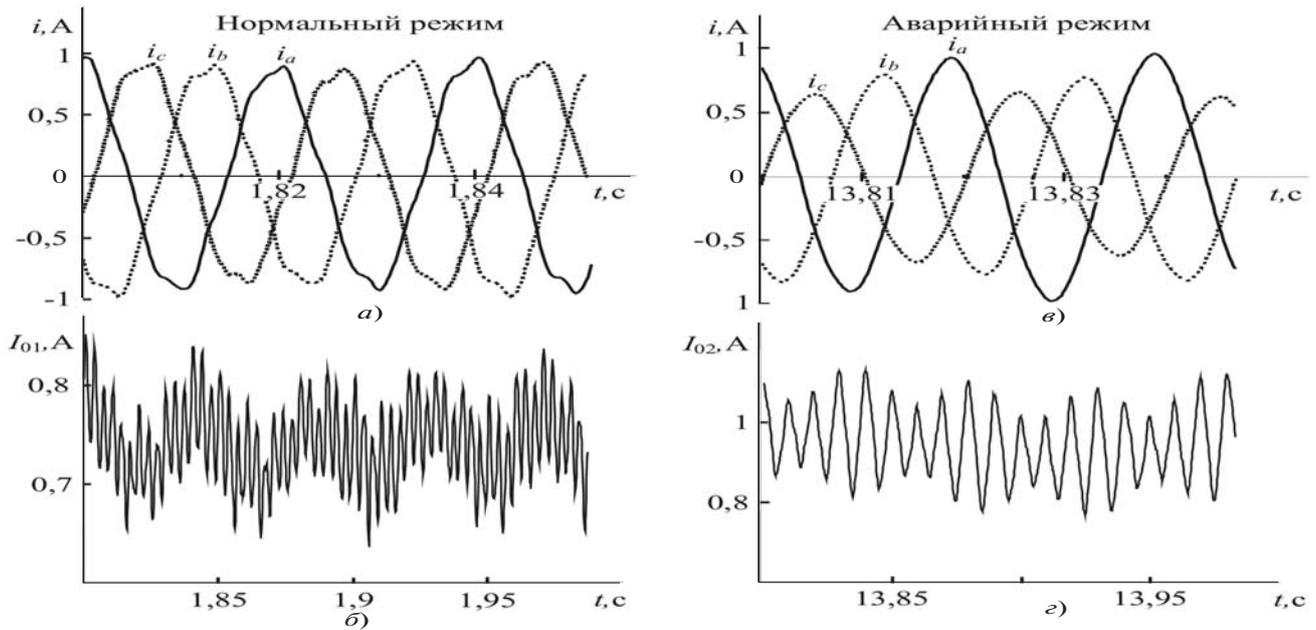


Рис. 3. Характеристики, полученные в нормальном и аварийном состояниях: *a* и *б* – трехфазные токи статора АД; *б* и *г* – вектор результирующего модуля тока статора

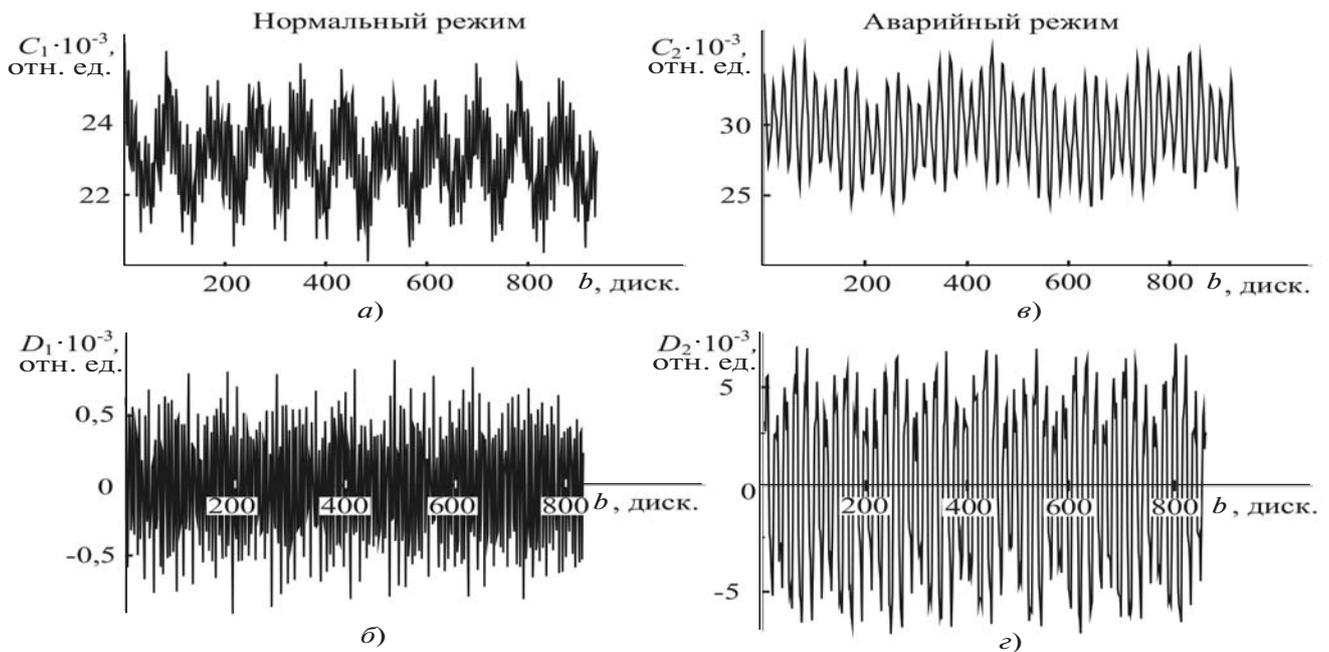


Рис. 4. Вейвлет-коэффициенты, рассчитанные в нормальном и аварийном состояниях: *б* и *г* – низкочастотные вейвлет-коэффициенты; *а* и *в* – высокочастотные вейвлет-коэффициенты

ных значений статорных токов. Отличительной особенностью данной диагностической системы является использование только штатных измерительных средств электрических величин.

**Выводы.** 1. Подтверждено, что повреждения цепей ротора по известным значениям токов статора выявляются как в статических, так и в динамических режимах без применения дополнительных специальных датчиков – акселерометров, тахогенераторов, датчиков потоков рассеяния и т.п.

2. Для получения диагностического признака повреждений цепей ротора рекомендуется с по-

мощью вейвлет-преобразования разделить информативный токовый сигнал на детализирующую и грубую составляющие, что позволит упростить настройку экспертной диагностической системы.

3. В ходе исследований было выявлено, что диагностические признаки наиболее явно и непротиворечиво проявляются в нагруженном состоянии работы АД, что имеет место в большинстве промышленных применений асинхронных электроприводов, которым не свойственны режимы холостого хода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Дьяконов В.П.** Вейвлеты от теории к практике. — М.: СОЛОН-Р, 2002.
2. **Воробьев В.И.** Теория и практика вейвлет-преобразования/Под ред. В.Г. Грибунина.— СПб: Вус, 1999.
3. **Глазырин А.С., Ланграф С.В.** Идентификация скорости и момента асинхронного двигателя с применением фильтра Калмана. — Электричество, 2009, № 12.
4. **Ланграф С.В., Глазырин А.С., Афанасьев К.С.** Применение наблюдателя Люенбергера для синтеза векторных бездатчиковых асинхронных электроприводов. — Изв. вузов. Электромеханика, 2011, № 6.
5. **Ткачук Р.Ю., Глазырин А.С., Полищук В.И.** и др. Нейросетевая идентификация и диагностика электрических машин в условиях сильных импульсных помех. — Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2011, № 2.

*Авторы: Тимошкин Вадим Владимирович окончил магистратуру ТПУ в 2010 г. по специальности «Электроприводы и системы управления электроприводов». Аспирант кафедры «Электропривод и электрооборудование» ТПУ.*

*Глазырин Александр Савельевич окончил ТПУ в 2000 г. по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов». В 2004 г. в ТПУ защитил кандидатскую диссертацию «Системы питания и автоматического управления вибрационными электромагнитными активаторами». Доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование» ТПУ.*

*Полищук Владимир Иосифович окончил Павлодарский индустриальный институт в 1990 г. по специальности «Электрические станции». Защитил кандидатскую диссертацию «Развитие теории построения защит ротора синхронного генератора от вихревых замыканий» в 2007 г. в Омском государственном техническом университете. Заведующий кафедрой «Электрические сети и электротехника» ТПУ.*

*Глазырина Татьяна Анатольевна окончила ТПУ в 2005 г. по специальности «Электрические машины». Ассистент кафедры «Электрические сети и электротехника» ТПУ.*