



УДК 621.313

А. М. Чамкин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Метод вейвлет-анализа для контроля состояния обмоток электрических машин

Описаны основные причины внутренних повреждений обмоток электрических машин. Рассмотрен метод вейвлет-анализа для диагностики неисправностей обмоток. Приведены основные преимущества вейвлет-анализа перед двумя другими популярными методами диагностики: импульсным и частотным. Описаны основные принципы вейвлет-преобразования. Представлены результаты экспериментов с использованием данного метода. Выявлены основные достоинства и недостатки этого метода диагностики.

Вейвлет-анализ, обмотка, диагностика, межвитковое замыкание, короткое замыкание

На сегодняшний день на подавляющем числе промышленных предприятий используется дорогостоящее оборудование, содержащее обмотки, из которого 70...80 % составляют электродвигатели. На любой, даже маленькой электростанции можно насчитать не менее десятка трансформаторов. Поэтому актуальность проблемы достоверного и надежного, а главное, своевременного обнаружения и локализации неисправностей высоковольтного электрооборудования возрастает с каждым годом.

Если диагностика обмоток производится несвоевременно или некачественно, то это может привести к выходу из строя электрооборудования, что, в свою очередь, приведет к серьезным финансовым потерям для предприятия из-за необходимости остановки производственного процесса для осуществления срочного ремонта. Основными причинами внутренних повреждений обмоток силовых трансформаторов являются:

– внутренний пробой в результате старения изоляции и действие частичных разрядов в месте будущего пробоя;

– недостаточная электродинамическая стойкость обмоток при коротком замыкании, которая практически сразу приводит к пробое изоляции в месте остаточных деформаций и витковому замыканию [1].

Наиболее простым, но в то же время надежным методом диагностики является импульсный метод, или метод низковольтных импульсов

(НВИ). Суть этого метода заключается в том, что на выводы одной из обмоток трансформатора или двигателя подается прямоугольный зондирующий импульс и одновременно наблюдается ток или напряжение, снимаемые с других выводов той же обмотки или с выводов других обмоток. Однако у этого метода есть серьезный недостаток: по результатам измерений возможна лишь качественная оценка неисправностей, поэтому дать уверенную интерпретацию изменений полученных сигналов удастся не всегда. Метод частотного (спектрального) анализа лишен этого недостатка, он позволяет количественно оценивать остаточные деформации, возникающие в обмотках. Кроме того, данный метод в меньшей степени зависит от схемы измерений (взаимного расположения измерительных кабелей, внешних помех, влияния ошиновки вблизи объекта измерений и других факторов) [2].

В основе метода частотного анализа лежит дискретное преобразование Фурье (ДПФ). В качестве базисных функций ДПФ использует синусоиды и косинусоиды, которые предельно локализованы в частотной области, но очень плохо локализованы (точнее, вообще не локализованы) во временной области. Из-за этого локальные изменения сигналов обнаружить практически невозможно, так как они «размазываются» по всей частотной области. Частично эта проблема реша-

ется использованием оконного преобразования Фурье (ОПФ). Суть этого метода заключается в том, что временной интервал разбивается на ряд промежутков – временных окон, в каждом из которых вычисляется свое преобразование Фурье. Если в каком-то окне существовали частотные составляющие некоторого сигнала, то они будут присутствовать в спектре. Однако и у ОПФ есть существенный недостаток: чем уже временное окно, тем лучше временное разрешение, но хуже частотное, и наоборот. В основе этой проблемы лежит принцип неопределенности Гейзенберга [3].

Непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) – это разложение произвольного входного сигнала на принципиально новый базис в виде совокупности волновых пакетов – вейвлетов. Вейвлеты характеризуются четырьмя свойствами:

- имеют вид коротких, локализованных по времени, волновых пакетов с нулевым значением интеграла;
- обладают возможностью сдвига по времени;
- способны к масштабированию (сжатию/растяжению);
- имеют ограниченный (или локальный) частотный спектр [3].

Благодаря этим свойствам вейвлет-преобразование обладает лучшей частотно-временной локализацией, чем ОПФ. При увеличении масштаба в плоскости «время–частота» окно будет расширяться по временной шкале и сужаться по частотной шкале, а при уменьшении масштаба – наоборот. Исходный вейвлет, к которому применяются операции масштабирования и сдвига, называют «материнским вейвлетом».

Прямое НВП сигнала $s(t)$ задается вычислением его вейвлет-коэффициентов по формуле

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) a^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

где Ψ – вейвлет-функция; a – коэффициент масштабирования вейвлетов, а b – коэффициент их сдвига. Обратное НВП осуществляется по формуле

$$s(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \int_0^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} C(a, b) a^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dad b}{a^2}, \quad (2)$$

где C_{Ψ} – константа, определяемая функцией Ψ .

НВП требует больших вычислительных затрат, поэтому для диагностики состояния обмоток

целесообразно использовать дискретное вейвлет-преобразование (ДВП). Для ДВП используются дискретные значения a и b , заданные на некотором множестве $Z = \{\dots -1, 0, 1, \dots\}$, равные 2^j и $k2^j$ соответственно, где j и k – целые числа. В итоге вычисление вейвлет-коэффициентов сводится к формуле

$$C(j, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) a_0^{-j/2} \Psi(a_0^{-j} t - k) dt,$$

а формула обратного преобразования преобразуется к виду

$$s(t) = \frac{1}{C_{\Psi}} \sum_{j \in Z} \sum_{k \in Z} C(j, k) a_0^{-j/2} \Psi(a_0^{-j} t - k).$$

При использовании в ДВП ортогональных материнских вейвлетов становится доступен кратномасштабный анализ (КМА). Суть КМА заключается в том, что на каждом уровне исходный сигнал раскладывается на 2 компоненты: аппроксимирующую и детализирующую. Аппроксимирующая компонента является сглаженной вариацией исходного сигнала и содержит его низкочастотные составляющие. Детализирующая компонента содержит высокочастотные составляющие исходного сигнала. На следующем уровне разложения в качестве исходного сигнала берется аппроксимирующая компонента и т. д. В результате КМА пространство разбивается на частотные полосы, содержащие различные составляющие исходного сигнала. При сравнении аппроксимирующих и детализирующих компонент, полученных в результате разложения сигнала с заведомо исправной обмотки, с компонентами того же уровня, полученными в результате разложения сигнала с других обмоток, среди них могут быть легко выявлены те, которые содержат замыкания.

Испытания проводились на тестовой обмотке, состоящей из 500 витков. Для подачи импульса и получения измерений использовался искатель витковых замыканий ИВЗ-2010 НТЦ «РАДЭК». ИВЗ накапливает напряжение в диапазоне от 100 до 3000 В, которое после достижения нужного значения в виде импульса подается на выводы обмотки, а затем принимает и обрабатывает сигнал, пришедший с других выводов этой же обмотки или с другой обмотки. В испытаниях использовался зондирующий импульс напряжения 500 В. Для оцифровки полученных сигналов и передачи их на ЭВМ по интерфейсу USB исполь-

зовалось устройство MD231 на базе быстрого 12-разрядного АЦП AD9629. Дальнейшая обработка полученных результатов велась с помощью математического пакета MATLAB, в частности, для нахождения аппроксимирующих и детализирующих компонент использовались функции пакета Wavelet Toolbox. Измерительная схема показана на рис. 1.

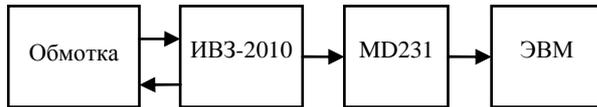


Рис. 1

В качестве материнского вейвлета был выбран ортогональный вейвлет – симлет 8-го порядка, так как он по форме близок к форме анализируемых импульсных сигналов и более симметричен, чем популярные вейвлеты Добеши, что улучшает качество анализа [4]. Вейвлет-функция и масштабирующая функция симлета 8-го порядка показаны на рис. 2 и 3 соответственно.

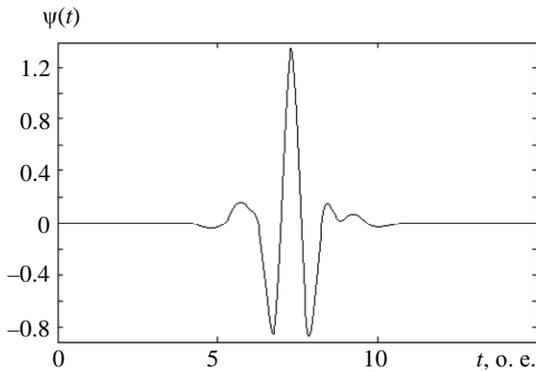


Рис. 2

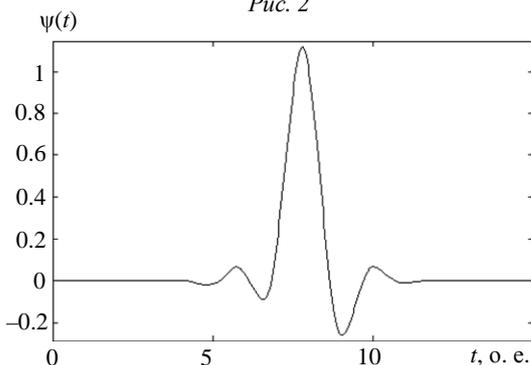


Рис. 3

Сигналы тока, полученные из ИВЗ-2010 и имеющие частоту дискретизации 10 МГц, были разложены на 7 уровней. В табл. 1 показаны значения частотных полос для каждой из семи полученных детализирующих компонент и аппроксимирующей компоненты 7-го уровня.

Таблица 1

Уровень	Вейвлет-компонента	Тип компоненты	Частотная полоса, кГц
1	d_1	Детализирующая	2500...5000
2	d_2		1250...2500
3	d_3		625...1250
4	d_4		312.5...625
5	d_5		156.25...312.5
6	d_6		78.13...156.25
7	d_7	Аппроксимирующая	39.06...78.13
	a_7		0...39.06

На рис. 4 показаны полученные сигналы тока с исправной обмотки и с обмотки с замкнутым витком.

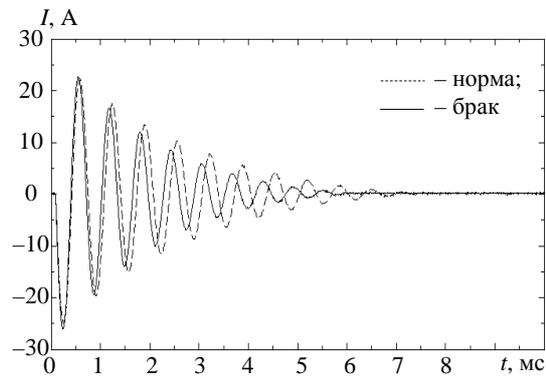


Рис. 4

Как видно из рисунка, сигнал тока с обмотки с замкнутым витком имеет более высокую амплитуду и меньшее время затухания по сравнению с сигналом тока с исправной обмотки. Однако дать какую-либо количественную оценку по этим сигналам затруднительно, можно лишь указать, что пиковым значением тока для исправного состояния обмотки является 24.9 А, а для неисправного состояния – 26.1 А, т. е. изменение составило всего лишь 4.5 %, что не всегда указывает на наличие неисправности, а может быть погрешностью измерений.

Компоненты вейвлет-разложения сигнала тока с исправной обмотки и с обмотки с замкнутым витком показаны на рис. 5 и 6 соответственно. Вейвлет-компоненты 1-го и 2-го уровней являются высокочастотным шумом, поэтому они были исключены из анализа.

Сравнивая рис. 5 и 6 можно заметить, что низкочастотная компонента a_7 при наличии в обмотке замкнутого витка затухает быстрее, чем низкочастотная компонента a_7 исправной обмотки. Кроме того, у неисправной обмотки повысилась амплитуда высокочастотной компоненты d_6

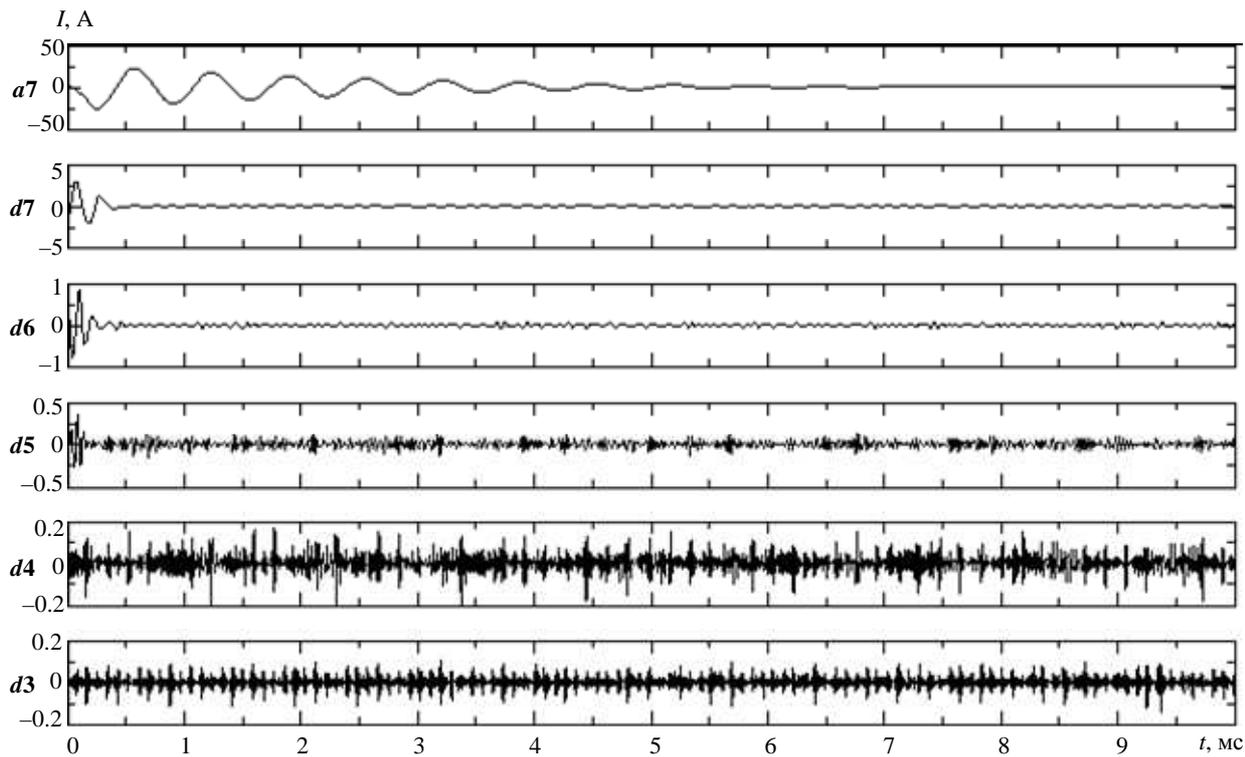


Рис. 5

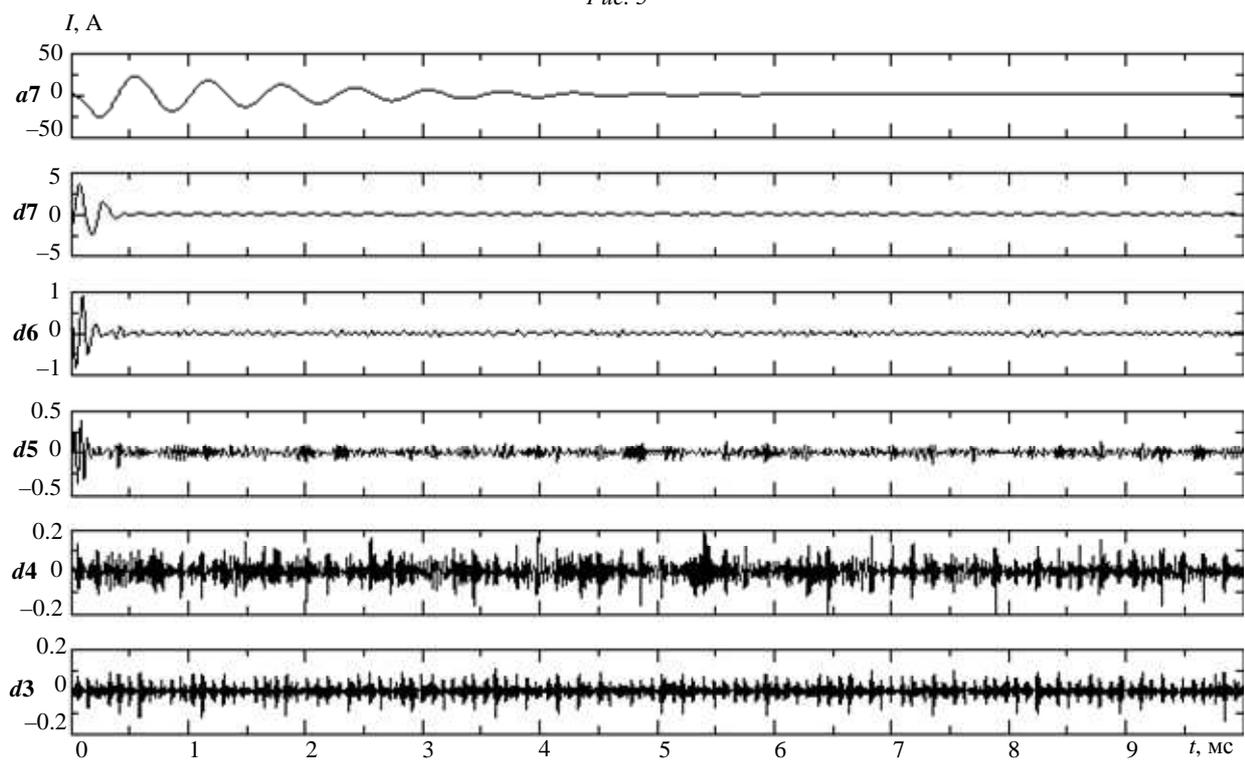


Рис. 6

относительно амплитуды той же компоненты исправной обмотки.

Чтобы количественно оценить полученные результаты, для каждого вейвлет-сигнала посчитаем его среднюю мощность. Средняя мощность сигнала $s(n)$ вычисляется по формуле

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [s(n)]^2,$$

где N – количество отсчетов сигнала. Средние мощности вейвлет-сигналов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Уровень	Вейвлет-компонента	Средняя мощность	
		Исправная обмотка	Неисправная обмотка
3	$d3$	0.0006	0.0006
4	$d4$	0.0015	0.0015
5	$d5$	0.0014	0.0016
6	$d6$	0.0035	0.0037
7	$d7$	0.0493	0.0668
	$a7$	27.4424	23.6658

Из табл. 2 видно, что средняя мощность низкочастотной компоненты обмотки с замкнутым витком относительно исправной обмотки уменьшилась на 13.8 %, а средняя мощность высокочастотной компоненты $d7$, наоборот, увеличилась на 26.2 %. Если бы подобные результаты были получены в ходе сравнения вейвлет-сигналов исправной обмотки с другой тестируемой обмоткой,

можно было бы с уверенностью говорить о наличии повреждения в тестируемой обмотке.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что метод вейвлет-анализа является мощным инструментом обнаружения неисправностей в обмотках электрических машин, его использование позволяет выявлять даже мелкие неисправности на ранней стадии появления. Метод вейвлет-анализа практически лишен недостатков двух популярных методов диагностики: импульсного и частотного. Он обладает хорошим частотно-временным разрешением и позволяет получить количественную оценку результатов, что намного расширяет область его применения. Единственным недостатком данного метода можно считать то, что он требует больших вычислительных затрат, чем импульсный и частотный методы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О повреждениях обмоток силовых трансформаторов и диагностике их геометрии методом низковольтных импульсов / А. Ю. Хренников, А. В. Рубцов, В. А. Передельский, А. А. Сафонов, В. А. Якимов // ЭЛЕКТРО. 2004. № 5. С. 13–18.

2. Хренников А. Ю. Методы низковольтных импульсов и частотного анализа для контроля механи-

ческого состояния обмоток силовых трансформаторов // ЭЛЕКТРО. 2007. № 2. С. 41–45.

3. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.

4. Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. М.: ДМК Пресс, 2008. 448 с.

A. M. Chamkin

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

THE METHOD OF WAVELET ANALYSIS FOR MONITORING THE WINDINGS CONDITION OF THE ELECTRICAL MACHINES

The article describes the main causes of internal damage to the electrical machine windings. The method of wavelet analysis to fault diagnosis windings is reviewed. The main advantages of wavelet analysis over the two other popular methods of diagnosis: pulse and frequency are shown. The basic principles of wavelet transform are described. The results of experiments using this method are presented. The main advantages and disadvantages of this diagnosis method are identified.

Wavelet analysis, winding, diagnosis, interturn fault, short circuit