

УДК 004.92: 621.317

КОНСТРУИРОВАНИЕ И ВЫБОР ВЕЙВЛЕТОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

М.А.Поляков, канд.техн.наук,

Запорожский национальный технический университет,

ул. Жуковского, 64, Запорожье, 69063, Украина.

По числовому представлению базисных вейвлетов для дискретного вейвлет-преобразования определена форма тестовых токов нагрузки силового трансформатора (СТ). Для этих токов выполнено компьютерное моделирование, определены параметры тепловых процессов в СТ – температура наиболее нагретой точки и расход ресурса изоляции обмоток в результате термического износа. Вейвлеты, соответствующие тестовым токам, воздействие которых на СТ приводит к максимизации (минимизации) этих параметров, выбраны в качестве базисных для получения вейвлет-спектра данных мониторинга параметров СТ. Значения и динамика коэффициентов этого спектра характеризуют критические тепловые процессы в СТ. Библ. 1, табл. 1.

Ключевые слова: вейвлеты, тепловые процессы, силовой трансформатор.

Анализ тепловых процессов в силовом трансформаторе (СТ) проводится в ходе мониторинга его параметров с целью выявления предаварийных состояний и ускоренного износа изоляции обмоток трансформатора. В процессе такого мониторинга измеряется и сохраняется на магнитном носителе промышленного компьютера значительный объем данных. Так как в ходе анализа не полностью используются возможности мощных вычислительных средств, в том числе промышленных компьютеров, которые имеются в составе системы мониторинга, то это снижает эффективность диагностирования предаварийных состояний. Одним из перспективных направлений анализа данных мониторинга является вейвлет-анализ. В литературе описаны различные типы вейвлет, но не сформулированы требования к базисным вейвлетам для анализа тепловых процессов в СТ. Это затрудняет их выбор и представляет нерешенную научно-техническую проблему.

Критические тепловые процессы в изоляции обмоток СТ определены в стандарте IEC 60076-7 Ed. 1: Power transformers - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers. К ним относятся выход за установленные пределы температуры наиболее нагретой точки изоляции θ_n и расхода ресурса ΔR_n изоляции обмоток СТ в результате термического износа. В настоящей работе проведен выбор базовых вейвлетов на основе подобия их форм формам токов нагрузки СТ, вызывающим критические тепловые процессы в СТ. В основе этой методики лежит свойство вейвлетов обнаруживать самоподобные (self-similarity) компоненты в анализируемом сигнале на различных уровнях его вейвлет-разложения.

Исходные данные для вейвлет-преобразования представляют собой массив значений токов нагрузки СТ, измеренных с интервалом времени Δt в ходе мониторинга параметров СТ. Определим требования к базисным функциям (скейлет функции φ и материнскому вейвлету ψ) дискретного вейвлет-преобразования (ДВП), которое экономично по числу операций и по требуемой памяти. К варьируемым параметрам базисных функций относятся количество интервалов r и значение x_{iq} , где q – номер элемента во множестве Q возможных значений компонентов базисной функции на каждом интервале $i = \overline{0, r-1}$. В качестве скейлет функции прямого ДВП выбрана функция $\varphi_d = \{1; \dots; 1\}$ с числом единиц, равным r . Материнский вейвлет прямого ДВП ψ_d представим r -разрядным числом $\{x_{(r-1)q} \dots x_{1q} x_{0q}\}$ в системе счисления с основанием, равным мощности множества Q . Требование нулевого интегрального значения базисной функции означает, что не всякое такое число является вейвлетом. Примеры семейств материнских вейвлетов с различными значениями r и Q приведены в таблице.

Семейства материнских вейвлетов

№	r	Q	Кол-во вариантов	Пример вейвлета $x_{(r-1)q}, x_{(r-2)q}, \dots, x_{iq}, \dots, x_{0q}$, оптимального по критерию №			
				1 ($\max(\theta_n)$)	2 ($\max(\Delta R_n)$)	3 ($\min(\theta_n)$)	4 ($\min(\Delta R_n)$)
1	2	-1, 1	2	-1, 1	1, -1	1, -1	-1, 1
2	3	-1, 0, 1	6	0, 1, -1	1, 0, -1	-1, 1, 0	-1, 0, 1
3	3	-2, 1	3	1, 1, -2	1, 1, -2	1, -2, 1	1, -2, 1
4	3	-1, 2	3	2, -1, -1	2, -1, -1	-1, -1, 2	-1, -1, 2
5	3	-2, 0, 2	6	2, 0, -2	2, 0, -2	-2, 2, 0	-2, 0, 2

Так, для $r = 3$, $Q = 2$ при $x_{i1} = 2$, $x_{i2} = -1$ допустимыми являются числа $\{2-1-1\}$, $\{-12-1\}$ и $\{1-12\}$, а при $x_{i1} = -2$, $x_{i2} = 1$ – числа $\{-211\}$, $\{1-21\}$ и $\{11-2\}$. Количество допустимых чисел вейвлетов растет с ростом Q и r . При $r = 4$ и $Q = 2 \div 4$ допустимыми являются от 6 до 24 чисел, а для $r = 5$ и $Q = 2 \div 5$ – от 30 до 120 чисел. Некоторые из этих чисел представляют известные вейвлеты: например, вейвлет Хаара (строка 2 в таблице), вейвлеты преобразования в ОБ [1] (строки 2 – 4).

Числовое представление материнского вейвлета используем для задания формы тестового тока нагрузки СТ $I_L(t) = I_{LB} + \Delta I x_{iq}$, где I_{LB} – базовый ток нагрузки; ΔI – базовое отклонение тока нагрузки. Слагаемое

Δx_{iq} определяет отклонение тока $I_L(t)$ от тока I_{LB} продолжительностью Δt_i на интервале времени i , где i изменяется от $r-1$ до 0 с ростом времени t . Оптимальным будем считать материнский вейвлет с формой, подобной форме изменяющегося во времени тока нагрузки, при воздействии которого на СТ максимизируется (минимизируется) параметр критического процесса – достигается максимальная (минимальная) температура θ_h и (или) максимальный (минимальный) расход ресурса ΔR_n . Обозначим через mw_{kn} – материнский вейвлет оптимальный по критерию k в пределах семейства с номером n .

Оптимальные материнские вейвлеты определены в результате моделирования тепловых процессов в СТ в среде MATLAB. Модель содержит блоки формирования внешних воздействий (тока $I_L(t)$ и температуры внешней среды θ_a), задания режима охлаждения (ONAN, OFAF), определения температуры θ_h и расхода ресурса ΔR_n . Для определения θ_h и ΔR_n использована модель в форме дифференциальных уравнений стандарта ИЕС 60076-7. Модель была настроена на конкретный тип СТ по рекомендациям приложения С этого стандарта. Моделирование проводилось на интервале времени $[0, 3\tau]$, где τ – тепловая постоянная масла СТ, с начальными условиями, соответствующими установившемуся тепловому режиму СТ при стационарной нагрузке током I_{LB} . Этот интервал был разбит на интервалы действия компонент тока Δx_{iq} продолжительностью $3\tau/r$ каждый. В результате моделирования определены достигнутые температуры θ_h и расходы ресурса ΔR_n для различных вариантов заданных тестовых токов. Разброс значений этих параметров для приведенных в таблице вейвлетов доходит до 40%. Оптимальные вейвлеты представлены в таблице. Например, оптимальным по критериям 1 и 2 среди вейвлетов с $r=3$, $Q=2$, при $x_{i1}=2$, $x_{i2}=-1$, различных I_{LB} , ΔI , θ_a и режимах охлаждения СТ является материнский вейвлет, представленный числом $\{2-1-1\}$. Базисная функция для прямого ДВП этого вейвлета имеет вид $\psi_d = \{2; -1; -1\}$, а для обратного – $\psi_r = \{2; -1; 2\}$. Прямое и обратное ДВП данных мониторинга СТ с использованием выбранных базисных функций выполняется по коэффициентам, рассчитываемым по методике [1].

Степень соответствия тока $I_L(t)$ воздействиям, вызывающим критические процессы в СТ, оценивается по вейвлет-спектру данных мониторинга и его сечениям для различных уровней разложения. Количественная оценка и динамика соответствия характеризует динамику состояний изоляции СТ. Так рост степени соответствия для вейвлетов mw_{1n} , mw_{2n} и ее уменьшение для вейвлетов mw_{3n} , mw_{4n} свидетельствуют о приближении к отказу изоляции или неприемлемому расходу ее ресурса. Автоматизация процедуры оценки позволяет снизить требования к квалификации оператора системы мониторинга. Наличие мощных компьютеров в составе этих систем снимает ограничения на вычислительную сложность алгоритмов при реализации ДВП.

Таким образом, детализирована методика моделирования и выбора оптимальных вейвлетов, выполнено сравнение различных вейвлетов, приведены формулы для определения коэффициентов разложения, пример использования выбранных вейвлетов при анализе данных мониторинга СТ, освещены вопросы реализации вейвлет-анализа в среде системы мониторинга.

1. Петергеря Ю.С., Жуйков В.Я., Терещенко Т.О. Интеллектуальні системи забезпечення енергозбереження житлових будинків. – К.: Медіа-ПРЕС, 2008. – 256с.

УДК 004.92: 621.317

Конструювання та вибір вейвлетів для аналізу теплових процесів у силовому трансформаторі

М.О.Поляков, канд техн.наук,

Запорізькій національній технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя-63, 69063, Україна.

За числовим уявленням базисних вейвлетів для дискретного вейвлет-перетворення визначено форму тестових струмів навантаження силового трансформатора (СТ). Для цих струмів виконано комп'ютерне моделювання, визначено параметри теплових процесів у СТ – температуру найбільш нагрітої точки та витрата ресурсу ізоляції обмоток внаслідок термічного зношення. Вейвлети, що відповідають тестовим струмам, дія яких на СТ призводить до максимізації (мінімізації) цих параметрів, обрано за базисні для отримання вейвлет-спектру даних моніторингу параметрів СТ. Значення та динаміка коефіцієнтів цього спектру характеризують критичні теплові процеси в СТ. Бібл. 1, табл. 1.

Ключові слова: вейвлети, теплові процеси, силовий трансформатор.

Design and choice wavelets for the analysis of thermal processes in the power transformer

M.O.Poliakov,

Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy str. 64, Zaporizhzhia, 69063, Ukraine.

According to the numerical representation of the basic wavelets for discrete wavelet-transformation, the form of test load currents of the power transformer (PT) are defined. For these currents, the computer modeling of thermal processes in PT is executed. The hot spot temperature and the loss of the winding isolation life of caused by thermal deterioration are defined. Wavelets, which correspond to test current, which influence on PT leads to max/min values of these parameters, are chosen as basis wavelets for reception of wavelet spectrum of wavelet spectrum of PT monitoring data. Value and dynamic spectrum factors characterize critical thermal processes in the PT. Reference 1, table 1.

Key words: wavelet, thermal processes, the power transformer.

1. Petergeria Yu.S., Zhukov V.Ya., Tereshchenko T.O. Intellectual systems of maintenance of power savings of apartment houses. The manual. – Kyiv: Media-PRESS, 2008. – 256 p.(Ukr)

Надійшла 20.01.2012

Received 20.01.2012