

УДК 621.313.13

В.Д. Павленко, канд. техн. наук,  
В.В. Череватый, З.П. Процына

## ПОСТРОЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЯДЕР ВОЛЬТЕРРА

*Розглянуто можливість побудови діагностичної системи з застосуванням математичного апарату рядів Вольтерра. Метод модельної діагностики базується на аналізі динамічних характеристик, які несуть найбільш повну інформацію щодо поточного стану об'єкта, що досліджується. Розрахункові дослідження виконані на основі польових математичних моделей.*

*Рассмотрена возможность построения диагностической системы с использованием математического аппарата рядов Вольтерра. Метод модельной диагностики основан на анализе динамических характеристик, которые несут наиболее полную информацию о текущем состоянии исследуемого объекта. Расчетные исследования выполнены с использованием полевых математических моделей.*

*Results of construction of nonparametric nonlinear dynamic model in the form of kernels Volterra for the switched reluctance motors on the basis of the given measurements of pulse responses with the purpose of use of the received model are resulted at construction of effective system of diagnostic check.*

В последнее время при разработке автоматизированных систем диагностического контроля и прогнозирования остаточного ресурса промышленных объектов все большее развитие получили методы модельной диагностики, основанные на построении информационных (функциональных, кибернетических) моделей. Математическое описание информационных моделей может быть получено по результатам исследования входных и выходных переменных (сигналов) объекта контроля – с использованием решения задачи идентификации [1,6]. Среди методов модельной диагностики, следует выделить методы, базирующиеся на анализе динамических характеристик, несущих наиболее полную информацию о текущем состоянии исследуемых объектов.

Динамические характеристики используются при формировании пространства диагностических признаков, в котором с помощью методов обучения распознаванию образов (статистической классификации) [5] или нейросетевых технологий [3] строятся диагностические модели (классификаторы) для оценки состояния объектов по данным

косвенных измерений – оценки динамических характеристик.

В данной работе исследуется эффективность применения указанной информационной технологии для распознавания текущего технического состояния вентильно – реактивного двигателя (ВРД). В процессе длительной работе ротор электромеханического преобразователя (ЭМП) ВРД испытывает трение о воздух и с течением времени воздушный зазор между ротором и статором в ЭМП увеличивается. Особенно это характерно для высокоскоростных электроприводов. При увеличении воздушного зазора снижаются энергетические показатели – энергия преобразуется с большими потерями. В связи с этим в процессе эксплуатации ВРД необходимо периодически контролировать величину воздушного зазора. При использовании для прямых измерений щупов, состоящих из набора калибровочных пластин, необходимо разбирать ЭМП, что является весьма трудоемкой операцией, сопряженной с простоями исследуемого оборудования. Поэтому актуальной становится разработка системы диагностического контроля воздушного зазора по данным косвенных измерений (непрямыми методами) с помощью построения информационных моделей.

Поскольку ВРД – нелинейная инерционная система, то динамические свойства его можно характеризовать с помощью математических моделей в виде рядов Вольтерра, последовательности многомерных весовых функций – ядер Вольтерра (ЯВ) [1]. Таким образом, в данном случае целью исследования является определение диагностической ценности (информативности) признаков, формируемых на основе ЯВ.

### Идентификация ВРД в виде ядер Вольтерра.

В общем случае соотношение “вход–выход” для нелинейного объекта может быть представлено рядом Вольтерра вида [4]

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) = \\ = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t \int w_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n x(\tau_i) d\tau_i, \quad (1)$$

где  $x(t)$  и  $y(t)$  – соответственно входной и выходной сигналы объекта;  $w_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  – ЯВ (весовая функция или импульсная переходная функция)  $n$ -го порядка;  $y_n(t)$  –  $n$ -я парциальная составляющая отклика.

На практике ряд (1) заменяют полиномом и обычно ограничиваются несколькими первыми членами ряда. При этом процедура идентификации заключается в выделении

парциальной составляющей  $y_n(t)$  и определении на основе ее ЯВ соответствующего порядка  $w_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)$  [1, 2].

Задача идентификации здесь решается с использованием имитационной модели в виде системы уравнений [4], задающей неявное описание ВРД типа “вход–выход” при фиксированном положении ротора

$$U_{\phi} = I_{\phi} R_{\phi} + \frac{d\Psi_{\phi}}{dt}, \quad (2)$$

$$\Psi_{\phi} = f_1(I_{\phi}, \Theta), \quad (3)$$

где  $U_{\phi}(t)$  – напряжение (входная переменная);  $I_{\phi}(t)$  – ток (измеряемый отклик ВРД, выходная переменная);  $R_{\phi}$  – сопротивление,  $\Psi_{\phi}$  – потокосцепление фазы;  $\Theta$  – угол положения ротора относительно статора.

Зависимость (3) является существенно нелинейной, что обусловлено принципом работы и геометрическими особенностями ВРД. Она была получена для четырех воздушных зазоров между ротором и статором – номинальном и с увеличением на 30, 60 и 90 % от номинального (рис. 1). Численный расчет зависимостей (3) производился на основе полевой математической модели методом конечных элементов по методике, описанной в [6].

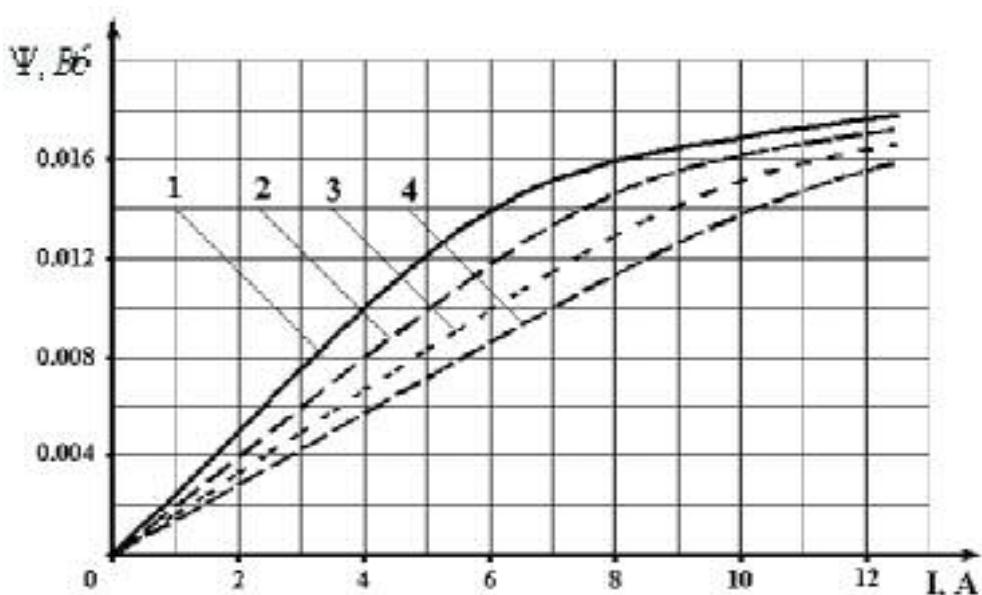


Рис. 1. Расчетные зависимости потокосцепления от тока фазы при  $\Theta = 30^0$ :

- 1 – для номинального воздушного зазора;
- 2, 3 и 4 – для зазора, увеличенного на 30, 60 и 90 % относительно номинального

С помощью метода идентификации [2] получены оценки ЯВ первого  $w_1(t)$  и диагональных сечений ЯВ второго  $w_2(t,t)$  порядка для номинального воздушного зазора (0.15 мм), а также для увеличенных зазоров на 30, 60 и 90 % относительно номинального. Что составляет 0.195, 0.24, 0.285 мм, соответст-

венно. В качестве объекта исследования использован ВРД-57 (номинальный момент – 0.05 Н·м, номинальное напряжение – 24 В, максимальная частота вращения – 4500 об/мин). Результаты идентификации представлены на рис. 2 и 3.

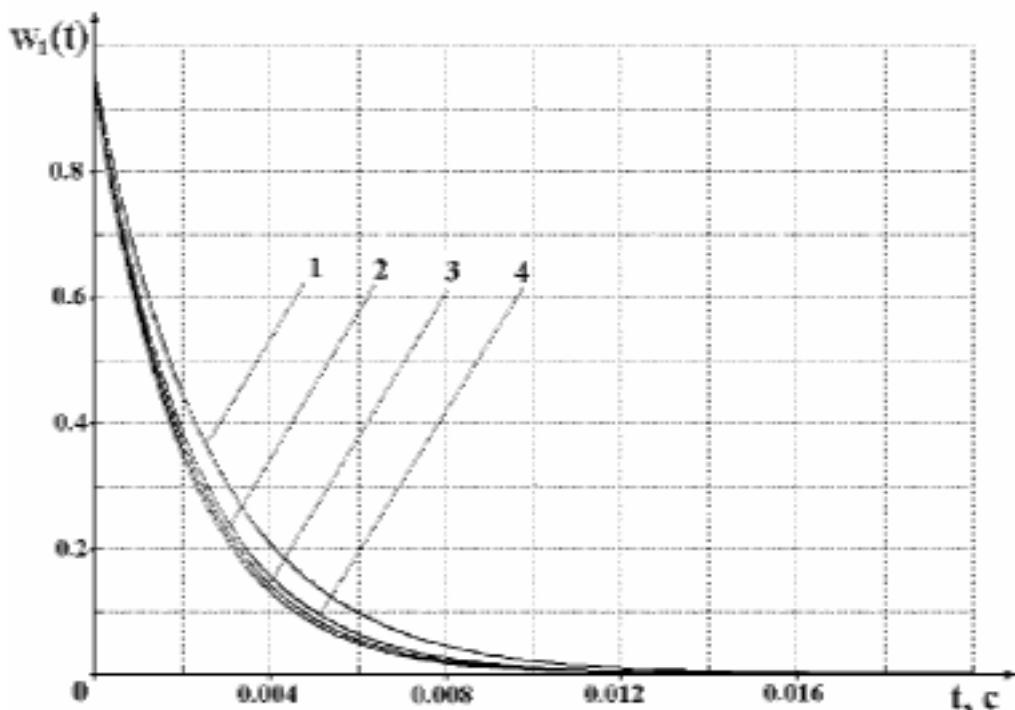


Рис.2. ЯВ первого порядка: 1 – для номинального воздушного зазора; 2, 3, и 4 – для зазора, увеличенного на 30, 60 и 90 % относительно номинального.

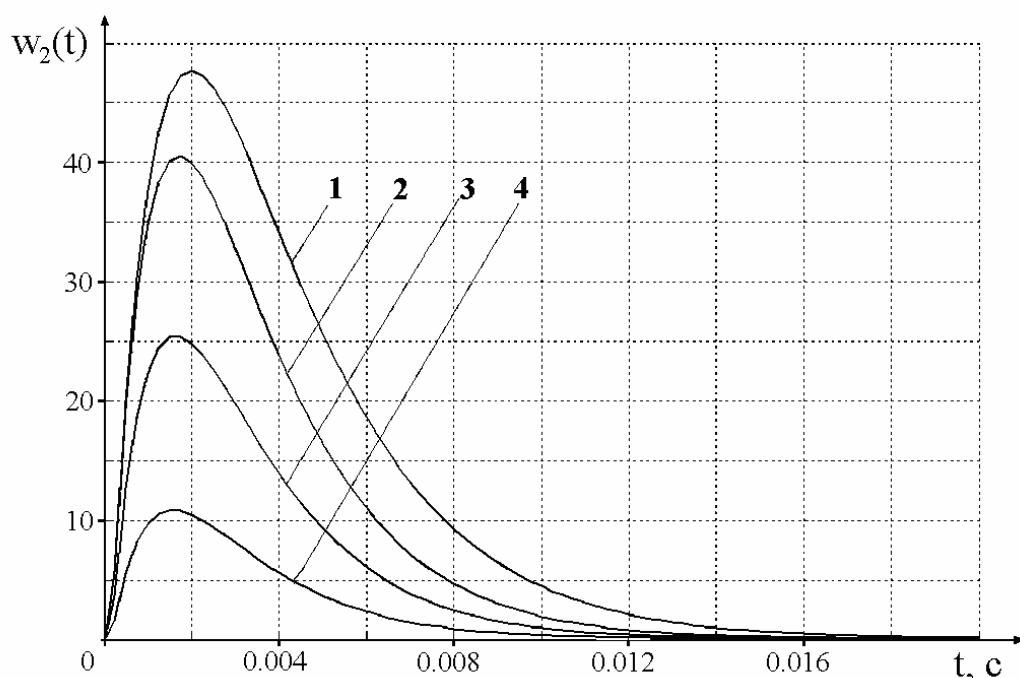


Рис. 3. Диагональные сечения ЯВ второго порядка: 1 – для номинального воздушного зазора; 2, 3, и 4 – для зазора, увеличенного на 30, 60 и 90 % относительно номинального

**Выводы.** Полученные результаты идентификации показывают, что ЯВ первого порядка практически не зависит от изменения воздушного зазора. Вместе с тем сечение ЯВ второго порядка существенно изменяется по величине и, следовательно, может использоваться в качестве источника первичных данных при построении диагностических моделей.

#### Список использованной литературы

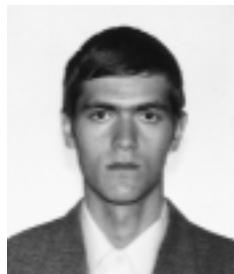
1. Данилов Л.В. Теория нелинейных электрических цепей / Данилов Л.В., Матханов П.Н., Филиппов Е.С. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1990. – 256 с.
2. Идентификация нелинейных динамических систем в виде ядер Вольтерры на основе данных измерений импульсных откликов / Павленко В.Д., Череватый В.В., Сайд Ибрагим Мухаммад Иssa // Труды межд. науч. конференции “Моделирование-2006” (SIMULATION-2006) / Киев, 16–18 мая 2006. – К.: ИПМЭ НАНУ. – 2006. – С. 349 – 355.
3. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Осовский С.; пер. с польского И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
4. Радимов И.Н. Моделирование режимов работы вентильного индукторного двигателя / Радимов И.Н., Рымша В.В., Малеванный О.Е. // Електротехніка і електромеханіка. – 2002. – № 2. – С. 60–64.
5. Ту Дж. Принципы распознавания образов / Ту Дж., Гонсалес Р.; пер. с англ. Под ред. Ю.И. Журавлева – М.: Мир, 1978. – 411 с.
6. Файнзильберг Л.С. Диагностика состояния объектов по фазовым траекториям наблюдаемых сигналов с локально сосредоточенными признаками / Файнзильберг Л.С. // Проблемы управления и информатики. – 2004. – №2 – С.56–67.



Павленко Виталий  
Данилович, канд. техн.  
наук, доц. каф. “Комп’  
ютеризированные систе-  
мы управління”, Одеск.  
нац. політехн. ун-та  
E-mail:  
[pavlenko\\_vitalij@mail.ru](mailto:pavlenko_vitalij@mail.ru).



Череватый Виталий  
Васильевич, аспирант  
каф. “Компьютеризиро-  
ванные системы управ-  
ления” Одеск. нац. поли-  
техн. ун-та.  
E-mail:  
[ch\\_vitaliy@mail.ru](mailto:ch_vitaliy@mail.ru)



Процина Зиновий  
Павлович, аспирант каф.  
електрических машин  
Одеск. нац. політехн.  
ун-та.  
E-mail:  
[procina.z@gmail.com](mailto:procina.z@gmail.com)

Получено 05.10.2009