

УДК 519.688

## РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОБМОТКИ РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

<sup>1</sup>Полищук В.И., <sup>1</sup>Крицкий М.В., <sup>2</sup>Серкова Ю.М., <sup>3</sup>Герасимов Н.В.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»,  
Самара, e-mail: nurochka18@yandex.ru;

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, e-mail: juliyaserkova@gmail.com;

<sup>3</sup>Филиал ОАО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемами  
Самарской и Ульяновской областей», Самара, e-mail: nvgerasimov@ya.ru

Статья посвящена изложению результатов исследования по разработке метода обработки цифровых сигналов для идентификации локальных неоднородностей с целью диагностики виткового замыкания обмотки ротора синхронного генератора. Синхронные генераторы являются сложной электромеханической системой. Многие из дефектов, возникающих в синхронном генераторе, например витковые замыкания в обмотке ротора, являются трудноопределимыми из-за отсутствия прямых причинно-следственных связей между доступными измеряемыми параметрами и величиной дефекта. Разработана экспериментальная установка, позволяющая проводить апробацию методов интеллектуальной идентификации и диагностики синхронного генератора. На базе экспериментального комплекса предложена и апробирована технология выделения полезного сигнала для системы диагностики. На основе экспериментальных данных, полученных с датчика магнитного поля рассеяния синхронного генератора, показано, что предложенный алгоритм достаточно надежно выявляет локальные неоднородности сигнала, связанные с повреждением обмотки ротора при малом проценте короткозамкнутых витков.

**Ключевые слова:** цифровой сигнал, метод декомпозиции, функции Лагерра, синхронный генератор, диагностика

## DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL TESTING METHODS OF FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF THE ROTOR WINDING SYNCHRONOUS GENERATOR

<sup>1</sup>Polischuk V.I., <sup>1</sup>Kritskiy M.V., <sup>2</sup>Serkova Y.M., <sup>3</sup>Gerasimov N.V.

<sup>1</sup>Samara State Technical University, Samara, e-mail: nurochka18@yandex.ru;

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: juliyaserkova@gmail.com;

<sup>3</sup>System Operator of the United Power System, Joint-stock Company,  
Samara, e-mail: nvgerasimov@ya.ru

The article is considered the results of research to develop a method of digital signal processing to identify local nonuniformities to diagnosed turn-to-turn short circuit in rotor winding of synchronous generator. The synchronized generators are complex electromechanical system. Many of the defects occurring in the synchronous generator, for example, turn-to-turn short circuit in rotor winding are difficult to define due to the lack of direct causal relationships between the available measured parameters and the magnitude of the defect. The experimental setup that enables the testing of methods for intelligent identification and diagnosis of the synchronous generator. On the basis of the experimental complex is proposed and tested technology of useful signal enhancement. On the basis of experimental data obtained from the magnetic field sensor dispersion turbine generator, it is shown that the proposed adaptive identification algorithms provide enough reliable detection of local nonuniformities in the signal due to the damage of the rotor winding with a small percentage of short-circuited turns.

**Keywords:** digital signal, decomposition technique, Lager function, synchronous generator, diagnostics

В такой сложной электромеханической системе, как синхронный генератор, некоторые из дефектов и повреждений, например витковые замыкания (ВЗ) в обмотке ротора и ряд других, являются трудноопределимыми по причине отсутствия прямых причинно-следственных связей между доступными параметрами, измеряемыми штатными средствами и физическими признаками дефекта [1, 3–5]. В связи с развитием современных цифровых сигнальных процессоров (DSP) для селективного вы-

явления диагностических признаков стало возможным применение эффективных математических методов обработки сигналов в реальном масштабе времени, позволяющих по совокупности информационных признаков выявлять конкретный дефект. При исследовании новых принципов выделения полезной цифровой информации для построения системы диагностики обмотки ротора синхронного генератора апробация проводилась на специально созданной экспериментальной установке.

**Постановка задачи**

Перед исследователями ставилась задача разработать метод выделения полезной цифровой информации о возникновении виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора и проверить основные принципы построения системы диагностики на экспериментальной установке.

**Экспериментальная установка**

Состав и принципиальная схема разработанной экспериментальной установки приведена на рис. 1. В состав установки входят: синхронный генератор G (ГАБ-4-Т/230), приводимый во вращение асинхронным двигателем M (АИР 100 L2), питаемым частотным

преобразователем ПЧ (Altivar 71), датчик момента ДМ (Mini-Smart Drehmomentsensor Typ 4502A50RAU), датчик оборотов ДО (ESS-PA005-3600), датчики вибрации подшипников (АВ-321FK), датчик магнитного поля ДМП (Индукционный датчик), датчики напряжения ДН1...3, датчики тока ДТ 1...3 (Шунт 75ШИП1-10-0.5), датчик угла нагрузки ДУНг, датчик тока возбуждения ДТВ (Шунт 75ШИП1-10-0.5), датчик напряжения возбуждений (делитель напряжения), аналого-цифровой преобразователь АЦП (РСІ 6024Е), автоматический регулятор возбуждения АРВ.

Для имитации виткового замыкания с обмотки ротора через дополнительные контактные кольца были выведены отпайки с замыканием 4, 10 и 30% витков полюса.

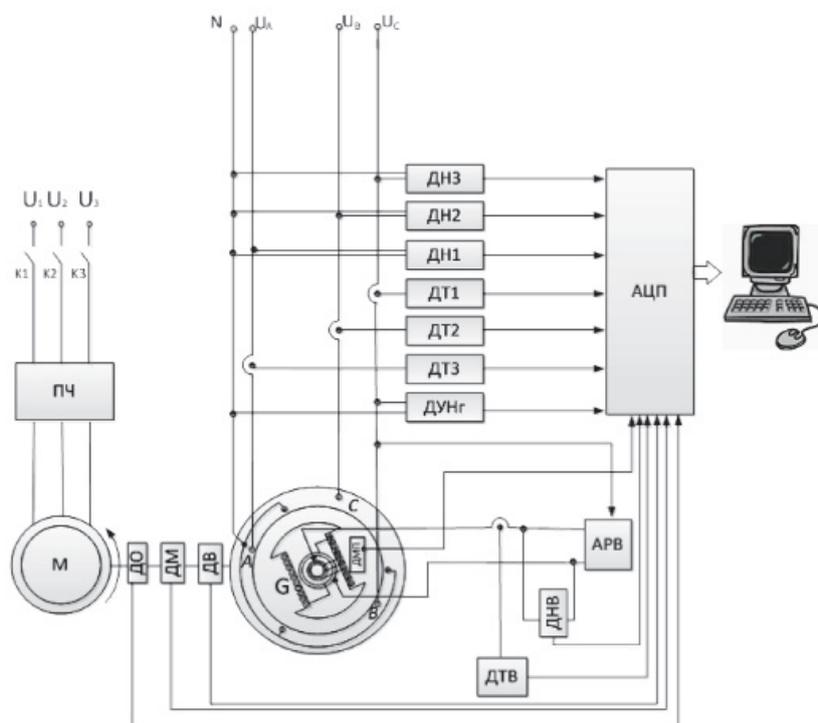


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

**Характеристики АЦП**

Количество каналов	16 однопроводных и 8 дифференциальных
Тип АЦП	Последовательная аппроксимация
Разрешение	12 бит, 1 в 4096
Скорость сэмплирования	20000 сэмплов в секунду (гарантировано)
Диапазон входных сигналов	Только биполярный
Входная связь	Постоянный ток
Макс. рабочее напряжение (сигнал + синфазный режим)	Каждый вход должен находиться в пределах ±11 В от земли
Размер буфера FIFO	512 сканов
Передача данных	DMA, прерывания, программируемый ввод/вывод
Режим DMA	Сбор вразброс
Размер памяти конфигурирования	512 слов

Два коннектора обеспечивают удобство доступа к входам/выходам плат сбора данных PCI 6024E персонального компьютера. Каждый коннектор имеет 16 каналов аналогового ввода с 68-ю контактами и восемь линиями цифрового ввода/вывода. Характеристики АЦП приведены в таблице.

В качестве одного из обрабатываемых сигналов используется ЭДС на выходе индукционного датчика магнитного поля, который установлен в торцевой зоне синхронного генератора.

#### Метод выделения диагностического сигнала

Выделение полезной информации о техническом состоянии изоляции обмотки ротора СГ возможно только на основе косвенных данных. Вследствие ряда конструктивных особенностей СГ информативной информацией о наличии повреждения в обмотке ротора, по мнению авторов, является анализ магнитной симметрии машины. Появление виткового замыкания в одном из полюсов ротора обязательно приводит к наличию локальных изменений в симметрии магнитного поля. Для выявления несимметрии предлагается использовать специализированный датчик магнитного поля (ДМП), установленный в свободном пространстве торцевой зоны синхронного генератора. Выходным параметром датчика является ЭДС, пропорциональная магнитной индукции в месте установки

ДМП. На рис. 2 приведены снятые осциллограммы ЭДС на выходе ДМП при отсутствии замыкания на холостом ходу (рис. 2, а) и при наличии замыканий (рис. 2, б). На рис. 3 приведены соответственно осциллограммы при нагрузке генератора.

После АЦП сигнал представляет собой временной ряд, который можно рассматривать как выборку нестационарного случайного сигнала, состоящего из аддитивной смеси полезной составляющей, частей, наведенных токами от статора и ротора и шумов.

Как видно из рис. 2 и 3, полезной информацией о наличии дефекта являются локальные изменения в одном из полупериодов, которые на рисунках отмечены пунктирной линией [7, 8]. Для решения задачи автоматического обнаружения локальных изменений предлагается применить декомпозицию полуволн сигнала на выходе датчика ЭДС на базе функции Лагерра [2, 6]. Декомпозиция по функциям Лагерра, по мнению авторов, является наиболее подходящей для анализа сигнала конечной длины, что и представляет собой исследуемый полупериод. Методика выделения диагностического сигнала о наличии повреждений в обмотке ротора заключается в следующем: первоначально сигнал за время одного периода разделяется на положительную и отрицательную составляющие. В нашем случае при частоте дискретизации в 10 кГц – 200 точек.

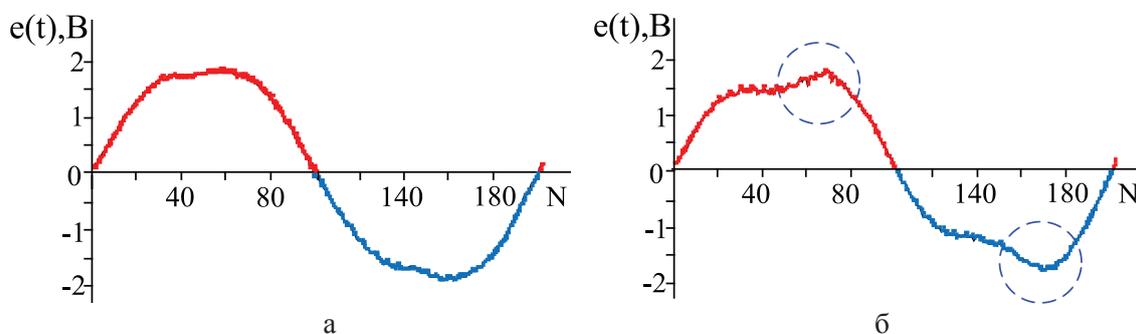


Рис. 2. Осциллограмма ЭДС на выходе ДМП в режиме холостого хода

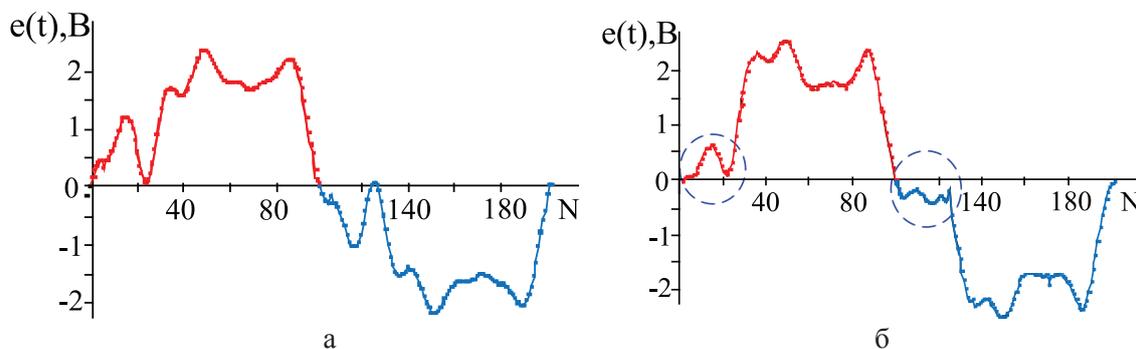


Рис. 3. Осциллограмма ЭДС на выходе ДМП при нагрузке

Разложение положительных и отрицательных частей сигнала по системе функций Лагерра записывается в виде ряда:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n l_n(t),$$

где  $c_n = \int_0^{\infty} e(t) l_n(t) dt$  – значения коэффициентов ряда;  $l_n(t)$  – функции Лагерра.

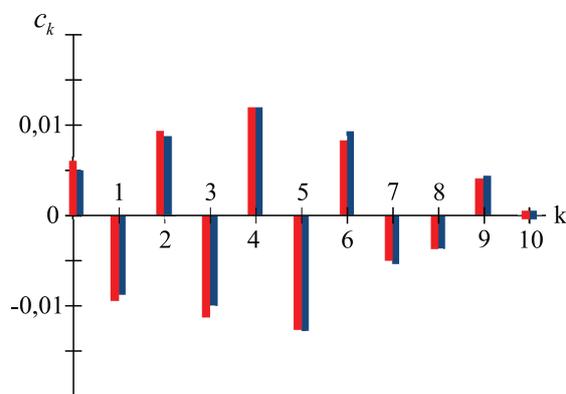
Функция Лагерра образуется при помощи полиномов, которые рассчитываются по формуле

$$L_n(\tau) = \frac{e^{-\tau}}{n!} \cdot \frac{d^n}{d\tau^n} (\tau^n e^{-\tau}).$$

Сами функции Лагерра рассчитывались по формуле

$$l_n(t) = \sqrt{2\alpha} \cdot \exp(-\alpha t) \cdot \sum_{j=0}^n (-1)^j \cdot \frac{C_n^j}{j!} \cdot (2\alpha t)^j,$$

где  $\alpha$  – масштабный коэффициент;  $C_n^j$  – число сочетаний из  $n$  по  $j$ . Значение  $\alpha$  выбирается таким образом, чтобы длительность исследуемого сигнала и функции Лагерра приблизительно были равны.



интегральный коэффициент несимметрии  $\delta$ , определяемый в процентах как:

$$\delta = \frac{\sum_{k=0}^K |c1_k| - |\sum_{k=0}^K c2_k|}{\sum_{k=0}^K |c1_k|} \cdot 100\%,$$

где  $c1_k$  и  $c2_k$  – коэффициенты ряда для положительной и отрицательной полувольты;  $K$  – количество коэффициентов ряда.

### Результаты экспериментальной проверки

При замыкании 4% витков  $\delta = 6,625\%$ , а без повреждения  $\delta = 1,33\%$ . Причем такое соотношение в%, с незначительными отклонениями, наблюдалось при нагрузке генератора от 25 до 100% нагрузки и при изменениях тока возбуждения (изменении выдаваемой реактивной мощности). При замыкании 10,5% витков обмотки возбуждения  $\delta$  возросло до 17,2%, и, следовательно, данный критерий принципиально может служить признаком возникновения виткового замыкания в обмотке возбуждения синхронной машины.

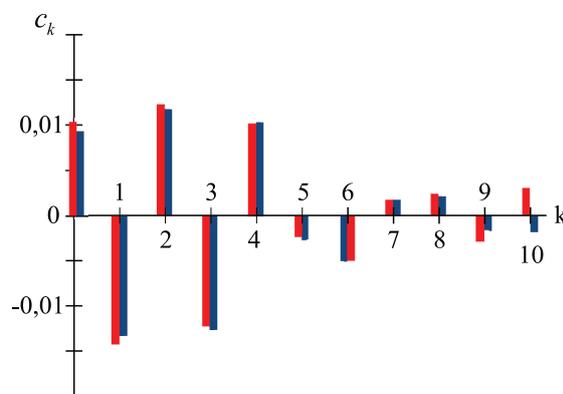


Рис. 4. Спектральные диаграммы для положительной и отрицательной полувольты: а – без виткового замыкания; б – с витковым замыканием:

■ – коэффициент отрицательной полувольты; ■ – коэффициент положительной полувольты

На основе расчетов десяти функций Лагерра построена спектральная диаграмма коэффициентов обеих полувольт (рис. 4).

Как видно из рис. 4, наблюдается сильное различие 8-го, 9-го и в особенности 10-го коэффициента при наличии виткового замыкания (рис. 4, б). В качестве критерия наличия замыкания в обмотке ротора синхронного генератора предлагается ввести

### Выводы

Предложен метод выделения диагностического сигнала повреждения обмотки ротора синхронного генератора, основанный на декомпозиции ЭДС на выходе датчика магнитного поля по функциям Лагерра. Экспериментально доказано, что предложенный алгоритм достаточно надежно выявляет локальные изменения сигнала, связанные с замыканием 4% витков обмотки ротора.

### Список литературы

1. Алексеев В.А. Определение состояний (диагностика) крупных турбогенераторов. – М.: НЦ ЭНАС, 2001. – 152 с.
2. Васильева Ю.З., Полищук В.И. Разработка способа выявления виткового замыкания в обмотке возбуждения синхронной машины // Научное обозрение. – 2014. – № 12. – С. 55–59.
3. Полищук В.И., Хамухин А.А. Выявление витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе вейвлет-анализа магнитных потоков рассеяния // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 85–93.
4. Полищук В.И. Построение защиты от виткового замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 4. – С. 57–61.
5. Розум Т.И., Полищук В.И. Метод выявления витковых замыканий в обмотке возбуждения синхронного генератора // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8 (часть 5). – С. 1061–1065.
6. Koornwinder Tom H., Wong Roderick S. C., Swarttouw René F. Orthogonal Polynomials // NIST Handbook of Mathematical Functions, Cambridge University Press. – 2010.
7. Sergeev V.L., Polishchuk V.I. Adaptive identification method of a signal from stray magnetic sensor for turbogenerator diagnostics // Journal of Siberian Federal University. – 2015. – Vol. 8(2). – P. 201–207.
8. Sergeev V.L., Polishchuk V.I., Kalayda V.T. Adaptive systems of non-stationary signals identification with additional a-priori information // XI International IEEE Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015), may 21–23, – 2015, Omsk.

### References

1. Alekseev V.A. Opredelenie sostojanij (diagnostika) krupnyh turbogeneratorov. M.: NC JeNAS, 2001. 152 p.

2. Vasileva Ju.Z., Polishhuk V.I. Razrabotka sposoba vyjavlenija vitkovogo замыкания в обмотке возбуждения синхронной машины // Nauchnoe obozrenie. 2014. no. 12. pp. 55–59.

3. Polishhuk V.I., Hamuhin A.A. Vyjavlenie vitkovykh замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе вейвлет-анализа магнитных потоков рассеяния // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2013. T. 323. no. 5. pp. 85–93.

4. Polishhuk V.I. Postroenie zashhity ot vitkovogo замыкания в обмотке ротора синхронного генератора на основе индукционного датчика магнитного поля рассеяния // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2012. T. 321. no. 4. pp. 57–61.

5. Rozum T.I., Polishhuk V.I. Metod vyjavlenija vitkovykh замыканий в обмотке возбуждения синхронного генератора // Fundamentalnye issledovaniya. 2013. no. 8 (chast 5). pp. 1061–1065.

6. Koornwinder Tom H., Wong Roderick S. C., Swarttouw René F. Orthogonal Polynomials // NIST Handbook of Mathematical Functions, Cambridge University Press. 2010.

7. Sergeev V.L., Polishchuk V.I. Adaptive identification method of a signal from stray magnetic sensor for turbogenerator diagnostics // Journal of Siberian Federal University. 2015. Vol. 8(2). pp. 201–207.

8. Sergeev V.L., Polishchuk V.I., Kalayda V.T. Adaptive systems of non-stationary signals identification with additional a-priori information // XI International IEEE Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015), may 21–23, 2015, Omsk.

### Рецензенты:

Гольдштейн В.Г., д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные электро-энергетические системы», ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», г. Самара;

Кубарьков Ю.П., д.т.н., профессор кафедры «Электрические станции», ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», г. Самара.