

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБМОТКИ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА

М.В. КРИЦКИЙ, В.И. ПОЛИЩУК

Самарский государственный технический университет, Самара

В настоящее время такое повреждение как витковое замыкание в обмотке ротора турбогенератора является одним из трудно выявляемых видов повреждения. При этом на турбогенераторах защиту от повреждения межвитковой изоляции обмотки ротора не устанавливают. Такое положение обусловлено отсутствием надежных и апробированных методов получения однозначно трактуемой информации о повреждении, фиксируемой штатными средствами измерения. Проблему отсутствия релейной защиты можно компенсировать системой технической диагностики, которая может с высокой вероятностью на основе комплекса косвенных признаков выделять диагностическую информацию, свидетельствующую о возникновении виткового замыкания в обмотке ротора.

При разработке системы мониторинга использовались методы цифровой обработки сигналов на базе алгоритмов адаптивной фильтрации по функциям Лагерра и математическая теория распознавания образов.

Разработана концепция построения системы мониторинга технического состояния обмотки ротора турбогенератора на базе интеллектуальных методов обработки информации, способных выявлять замыкание одного витка.

Мониторинг состояния обмотки ротора позволяет не только получать информацию о техническом состоянии машины, в процессе эксплуатации определяя степень развития повреждения, но и может быть использован для проверки качества изготовления обмотки нового ротора или ротора после его ремонта.

Ключевые слова – турбогенератор, мониторинг, витковое замыкание, адаптивная фильтрация.

Введение

Основным источником выработки электрической энергии являются турбогенераторы (ТГ). В настоящее время около 80% установленных ТГ на электростанциях находятся в эксплуатации более 20 лет. В связи с таким сроком службы вероятность повреждений в обмотках ротора ТГ резко возрастает [12]. Одним из распространенных видов повреждений являются межвитковые замыкания на корпус или возникновение двойного замыкания на корпус («землю») обмотки ротора [1, 2].

В то же время, на ТГ защиты от межвитковых замыканий обмотки ротора не устанавливаются [3, 4]. Также отсутствуют и апробированные системы технической диагностики, способные диагностировать повреждения межвитковой изоляции обмотки ротора ТГ во всех эксплуатационных режимах работы. Такое положение обусловлено отсутствием методов и средств получения однозначно трактуемой информации о возникновении повреждения межвитковой изоляции, надежно фиксируемой штатными средствами измерения [7–10; 11].

Построение технической диагностики, функционирующей в эксплуатационных режимах работы генератора, необходимо осуществлять на основе ряда косвенных

признаков, свидетельствующих о связи между физическими процессами при пробоях межвитковой изоляции и изменением электрических параметров машины [6].

Одним из косвенных признаков возникновения витковых замыканий (ВЗ) в обмотке ротора ТГ является искажение симметрии магнитного поля [11].

Цель. Разработать метод выделения полезной цифровой информации о возникновении виткового замыкания в обмотке ротора ТГ на основе анализа симметрии магнитного поля.

Постановка задачи. Используя сигнал на выходе датчика магнитного поля рассеивания, установленного снаружи ТГ на торцевом щите, выделить полезную составляющую о ВЗ при помощи декомпозиции сигнала по функциям Лагерра, проверить основные принципы построения системы диагностики на экспериментальной установке.

Методы и средства. Для снятия данных используется датчик магнитного потока, представляющий собой магнитный трансформатор тока (рис. 1). В датчике размещен П-образный сердечник 1 из трансформаторной стали. Обмотку 2 катушки из изолированного провода наматывают на каркас 3 из изоляционного материала. Сердечник датчика должен плотно, без воздушного зазора прилегать к торцевому щиту 4 ТГ. Благодаря такой конструкции датчик не подвержен воздействию внешних магнитных полей.

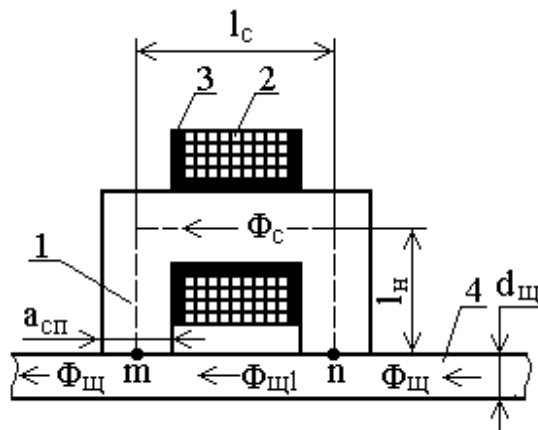


Рис. 1. Конструкция датчика магнитного потока

Экспериментальная установка. Состав и принципиальная схема разработанной экспериментальной установки показаны на рис. 2. 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 Тип 4502A50RAU); датчик оборотов ДО (ESS-PA005-3600); датчики вибрации подшипников (AB-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 (PCI 6024E); 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.

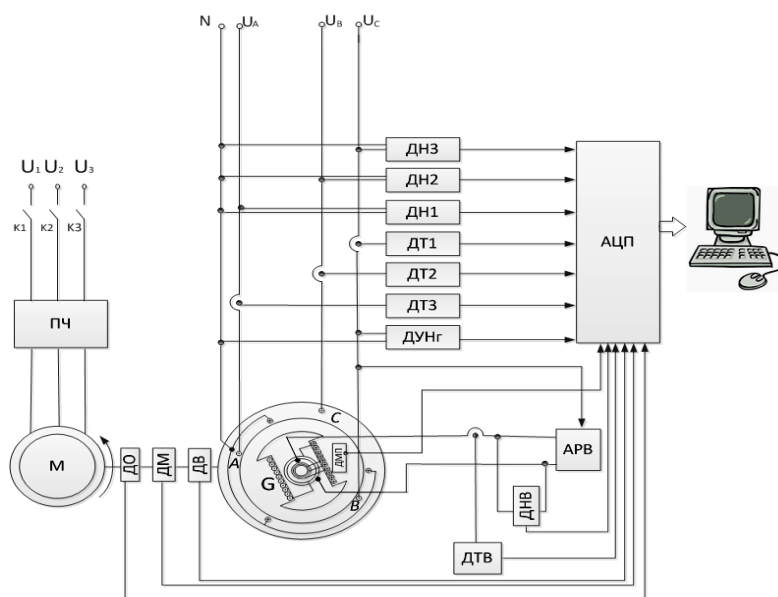


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки

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 линий цифрового ввода/вывода.

Для получения данных о наличии ВЗ были сняты экспериментальные данные с действующей установки. На выходе датчика (рис. 3) при возникновении ВЗ возникают неоднородности, выделенные кругами (рис. 3, б), которые свидетельствуют о наличии повреждения межвитковой изоляции [5]. На рис. 4, а и 4, б показаны, соответственно, осциллограммы при нагрузке генератора.

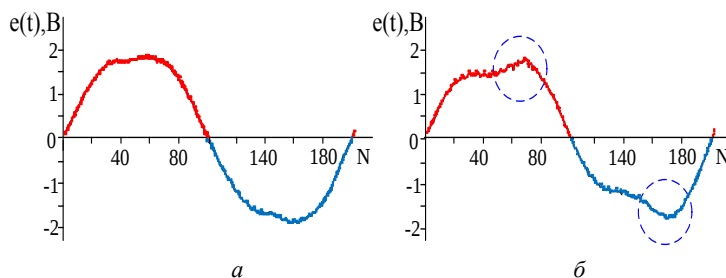


Рис. 3. Осциллограмма ЭДС на выходе ДМП в режиме холостого хода

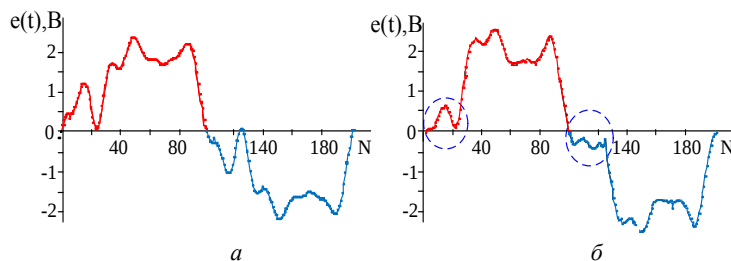


Рис. 4. Сигнал на выходе ДМП в нагрузочном режиме:
а – без виткового замыкания; б – с витковым замыканием

Для выделения информации предлагается использовать декомпозиции сигнала по функциям Лагерра [5]. Функция Лагерра получают с помощью ортогональных полиномов, расчетная формула которых имеет вид

$$L_n(\tau) = \frac{e^\tau}{n!} \cdot \frac{d^n}{d\tau^n} (\tau^n e^{-\tau}). \quad (1)$$

Поскольку полиномы Лагерра образуют систему расходящихся при функций, для разложения сигналов используют функции Лагерра

$$l_n(\tau) = e^{-\tau/2} L_n(\tau), \quad n=0,1,2,\dots \quad (2)$$

После замены $\tau = 2\alpha t$ и умножения на нормирующий коэффициент $\sqrt{2\alpha}$, в общем виде функции описываются формулой

$$l_n(t) = \sqrt{2\alpha} \cdot \exp(-\alpha t) \cdot \sum_{j=0}^n (-1)^j \cdot \frac{C_n^j}{j!} \cdot (2\alpha t)^j, \quad (3)$$

где C_n^j – число сочетаний из n по j .

Важным пунктом спектрального анализа с использованием функций Лагерра является выбор значения масштабного коэффициента α . Его значение рекомендуется выбирать так, чтобы длительность исследуемого сигнала и функции Лагерра были примерно равны.

Функция Лагерра получила широкое распространение в системах обработки сигналов различного назначения. Это в значительной степени объясняется простотой их генерирования.

Информационным сигналом для дальнейшего анализа выступает оцифрованный ряд АЦП временной ряд ЭДС, полученный с выхода датчика магнитного поля рассеяния. Частота дискретизации АЦП 10 кГц, следовательно, исследуемый сигнал в течение одного периода представлен 200 точками данных рис. 5. Для извлечения информации о наличии такого искажения исходный сигнал разбивается на два сигнала: первый сигнал «синий» (рис. 5) содержит только положительные полуволны, а второй сигнал «зеленый» – только отрицательные.

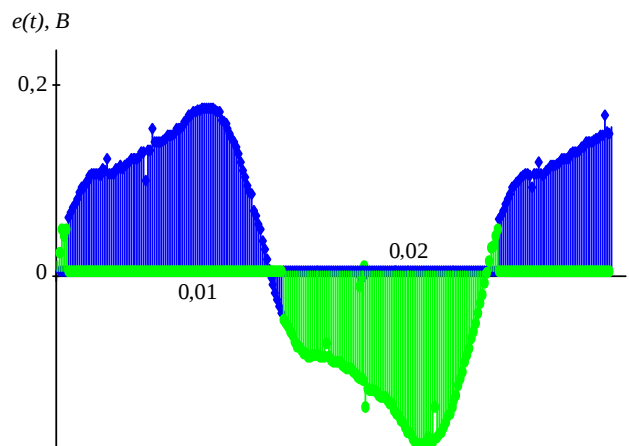


Рис. 5. Исходный сигнал, разбитый на положительные и отрицательные полуволны

Положительная полуволна раскладывается на коэффициенты ряда разложения по системе функций Лагерра в течение одного периода. Такая же процедура проводится с отрицательной полуволной за время одного периода. Для выделения полезной

информации о наличии повреждения воспользуемся аппаратом теории распознавания образов. Эти компоненты разложения сравниваются друг с другом (рис. 6).

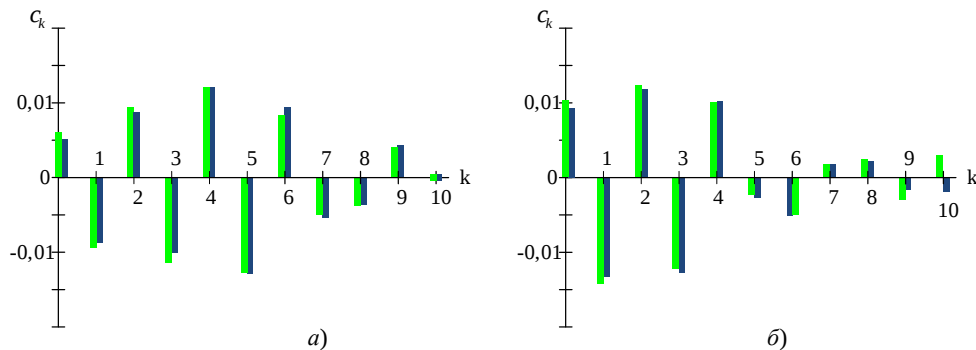


Рис. 6. Спектральные диаграммы для положительной и отрицательной полуволны: *a* – без виткового замыкания; *б* – с витковым замыканием. ■ – коэффициент отрицательной полуволны; ■ – коэффициент положительной полуволны

Как видно из рис. 4, наблюдается сильное различие 8, 9 и в особенности 10-го коэффициента при наличии виткового замыкания (рис. 6, *б*). В качестве критерия наличия замыкания в обмотке ротора синхронного генератора предлагается ввести интегральный коэффициент несимметрии, определяемый в процентах как

$$\delta = \frac{\sum_{k=0}^K |c1_k| - |c2_k|}{\sum_{k=0}^K |c1_k|} \cdot 100\%, \quad (4)$$

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

Результаты экспериментальной проверки. При замыкании 4% витков $\delta = 6,62\%$, а без повреждения $\delta = 1,33\%$. Причем такое соотношение в %, с незначительными отклонениями, наблюдалось при нагрузке генератора от 25 до 100% и при изменениях тока возбуждения (изменении выдаваемой реактивной мощности). При замыкании 10,5% витков обмотки возбуждения δ возросло до 17,2%. Следовательно, данный критерий принципиально может служить признаком возникновения виткового замыкания в обмотке возбуждения синхронной машины.

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.

Summary

Such damage as turn-to-turn short-circuits in turbogenerator rotor winding is one of the difficult revealed types of damage nowadays. Thus protection against interturn insulation of a rotor winding damage in turbogenerators isn't established. Such situation is caused by lack of the reliable and approved methods of obtaining unambiguously treated information about damage fixed by regular measuring devices. The lack of relay protection

can be offset by the system of technical diagnostics which, basing on indirect evidence, is able to send the diagnostic signal pointing at the emergence of the turn-to-turn short-circuit in a rotor winding.

Materials and Methods: During development of the monitoring system methods, digital processing of signals on the basis of adaptive filtration algorithms and mathematical possibility theory application were used.

Results: The creation concept of a turbogenerator rotor winding monitoring system technical condition, on the basis of intellectual methods of information processing capable to reveal short circuit of single turn is developed.

Conclusions: Condition monitoring of rotor winding allows not only receiving information about technical condition of the device, in operation process extent of damage development, but also could be used for quality check of a new rotor winding production or a rotor after its repair.

Keywords: *turbogenerator, monitoring, turn-to-turn short-circuit, adaptive filtration.*

Литература

1. Алексеев Б.А. Определение состояний (диагностика) крупных турбогенераторов. М.: НЦ ЭНАС, 2001. 152 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. 3-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1978. 832 с.
3. Глебов И.А., Данилевич Я.Б. Диагностика турбогенераторов. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1989. 119с.
4. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин. Л.: «Энергия», 1969. 272 с.
5. ГОСТ 27905.1-88. Руководство по оценке и идентификации систем изоляции электрического оборудования. Введен в действие с 01.01.1990 г. Постановление Государственного комитета СССР по стандартам от 25.11.1988 № 3842 международный стандарт МЭК 505-75.
6. Объем и нормы испытаний электрооборудования / Под общ ред. К.М. Антипова, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. 6 изд. М.: Изд. ЦНТИ «ИННОВАТИКА», 2009.
7. 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.
8. 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.
9. Полищук В.И., Крицкий М.В. Герасимов Н.В. Разработка и экспериментальная апробация метода функциональной диагностики обмотки ротора синхронного генератора // Фундаментальные исследования. 2015. № 11 (часть 6). С. 1104–1109.
10. Правила технической эксплуатации электрических станции и сетей Российской Федерации. М.: ЭНАС, 2008. 264с.
11. Розум Т.И., Полищук В.И. Метод выявления витковых замыканий в обмотке возбуждения синхронного генератора // Фундаментальные исследования. 2013. № 8 (часть 5). С. 1061–1065.
12. Хазан С.И. Турбогенераторы: Повреждения и ремонт / Под ред. Устинова П.И.. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983, 520с.

Поступила в редакцию

17 октября 2016 г.

Крицкий Михаил Викторович – аспирант Самарского государственного технического университета.
E-mail: nurochka18@yandex.ru. Тел: 8(917)0129874.

Полищук Владимир Иосифович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» Самарского государственного технического университета.
E-mail: polischuk_vi@mail.ru. Тел: 8(987)9430105.