

## СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ МОНИТОРИНГА МАГНИТНОГО ПОТОКА



для контроля состояния роторов турбогенераторов в процессе эксплуатации

МЛАДЕН САСИЧ, С.Р. КЭМПБЕЛЛ, БЛЕЙК ЛЛОЙД  
(MLADEN SASIC, S. R. CAMPBELL & BLAKE LLOYD)

Журнал IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE, СЕНТ.-ОКТ. 2011 г. • WWW.IEEE.ORG/ с. 66-70

МОНИТОРИНГ МАГНИТНОГО ПОТОКА с помощью датчиков магнитного потока в воздушном зазоре – это отработанная технология, которая много лет используется в синхронных машинах для выявления межвитковых КЗ в роторной обмотке. Эта информация имеет большое значение для планирования плановых отключений с целью ремонта, а также для содействия анализу вибраций в процессе эксплуатации. Для измерений магнитного потока традиционно используются датчики магнитного потока, установленные на клиньях статора, и подключенный к ним портативный или стационарный измерительный

прибор. Для обеспечения достоверной диагностики, сигналы от датчика магнитного потока должны измеряться при различных значениях нагрузки генератора в диапазоне от нуля до полной нагрузки. Это требование является серьезным препятствием для применения этого способа в агрегатах с базисной нагрузкой, для которых трудно реализовать изменение нагрузки. Новая конструкция датчика магнитного потока, установленного на зубе статора, и новые алгоритмы анализа измерений позволяют уменьшить необходимость испытаний при различных значениях нагрузки и в то же время обеспечить достоверную диагностику. В статье рассматривается применение новой аппаратуры и

программного обеспечения (ПО), а также примеры использования, которые демонстрируют эффективность нового метода для устранения необходимости изменения нагрузки.

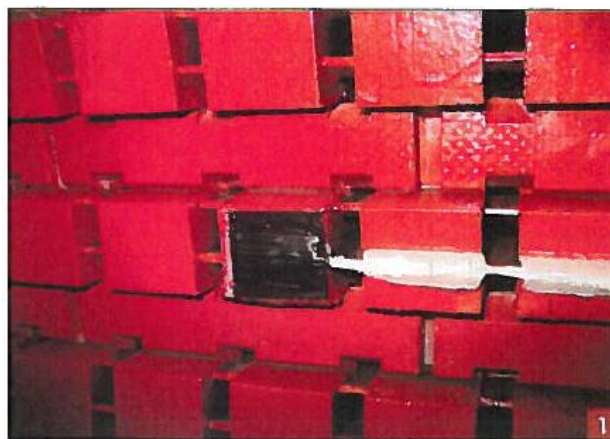
### Роторы турбогенераторов

Ротор турбогенератора состоит из сплошной поковки, изготовленной из стального ферромагнитного сплава, и медных обмоток, размещенных в пазах поковки. Обмотка фиксируется в пазах с помощью стальных, бронзовых или алюминиевых клиньев. Секции обмотки закрепляются на каждом торце ротора стопорными кольцами. Изоляция современных роторных обмоток выполняется из полос и каналов из ламината эпоксидной смолы / полиэфирного стекла / номекса. Полосы обеспечивают межвитковую изоляцию, а формованные каналы - корпусную изоляцию. Конструкция изоляции ротора должна выдерживать электрические, механические, тепловые и климатические нагрузки. Межвитковые КЗ образуются из-за отказов межвитковой изоляции, и довольно часто появляются в крупных турбогенераторах. Основная причина появления межвитковых КЗ в роторных обмотках – загрязнение токопроводящими продуктами износа, а также перемещения витков роторной обмотки друг относительно друга под действием больших центробежных нагрузок и осевых сил теплового расширения. Состояние изоляции роторной обмотки трудно определить во время плановых отключений из-за ограниченного доступа, а также из-за того, что отказы часто являются перемежающимися (пропадающими), т.е. появляются при работе и исчезают при остановке. Поэтому испытания в процессе эксплуатации являются эффективным способом обнаружения и локализации межвитковых КЗ, которые затем могут быть устранены во время плановых отключений.

Контроль магнитного потока с помощью временно или постоянно установленных датчиков магнитного потока используется с начала 1970-х годов [1]. Измерения магнитного потока проводятся для обнаружения наличия межвитковых КЗ в роторной обмотке. Все известные методы основаны на измерении относительно слабого магнитного потока рассеяния (потока рассеяния в пазу ротора) с помощью гибких или жестких датчиков в полимерном корпусе, установленных на клиньях статора [2] – [4]. Величина потока рассеяния от каждого паза ротора пропорциональна числу ампер-витков в каждом пазу. При наличии межвитковых КЗ число ампер-витков в данном пазу уменьшается, и поток рассеяния снижается. Величину этих потоков рассеяния можно измерить с помощью портативных или стационарных приборов, и короткозамкнутые витки можно выявить путем сравнения разностей наведенных напряжений для разных полюсов. Основная трудность при использовании прежних технологий – необходимость изменять нагрузку генератора, чтобы обеспечить максимальную чувствительность к короткозамкнутым виткам в каждом пазу ротора. Другие трудности диагностирования межвитковых КЗ связаны с типом датчиков и с приборным обеспечением / алгоритмами для обнаружения короткозамкнутых витков [2] – [4].

### Конструкция датчика полного потока

Некоторые недостатки существующих образцов датчиков связаны с их конструкцией и методами установки. Доступные на рынке датчики магнитного потока обычно состоят из проволочной катушки, намотанной особым образом, на упругой подвеске или в корпусе из эпоксидной смолы [5]. Обычно такие датчики содержат мощный заземленный экран, создающий вихревые токи под воздействием сильных магнитных полей, возникающих в воздушном зазоре вращающейся машины. Эти вихревые токи могут создавать помехи для измерения потоков рассеяния. Другой недостаток существующих конструкций датчиков магнитного потока – они могут смещаться под воздействием большой ветровой нагрузки, возникающей в воздушном зазоре, вследствие собственной массы и габаритов, или могут быть повреждены во время установки ротора после капитального ремонта.

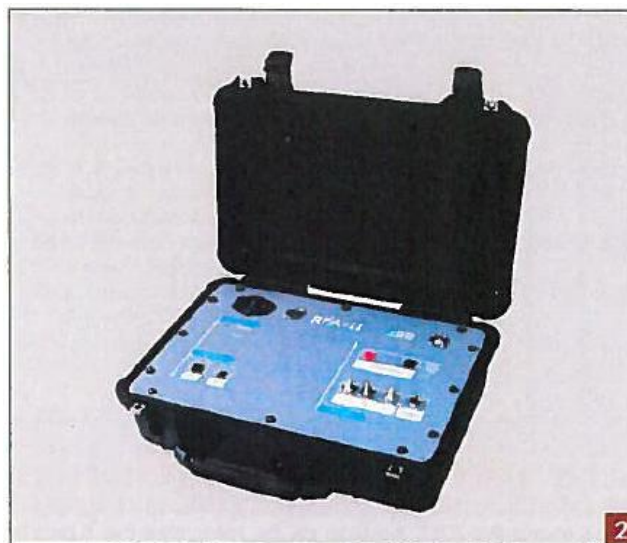


Образцы новых датчиков, установленные на зубец сердечника статора (фото предоставлено Iris Power LP.)

Чтобы минимизировать связанные с этим риски, некоторые производители датчиков магнитного потока требуют, чтобы клинья, на которые будут устанавливаться датчики потока, были просверлены, и были установлены крепежные штифты. Эта операция может ухудшить механические свойства клина; кроме того, она является существенным вмешательством в конструкцию машины. Более современные образцы датчиков позволяют преодолеть недостатки традиционных конструкций. Датчики новой конструкции представляют собой многослойную печатную плату на гибкой подложке. Гибкий датчик предназначен для установки на зубец статора (рис. 1). Новый датчик измеряет непосредственно основной магнитный поток, так как он установлен на зубец стального статора, а не на клин.

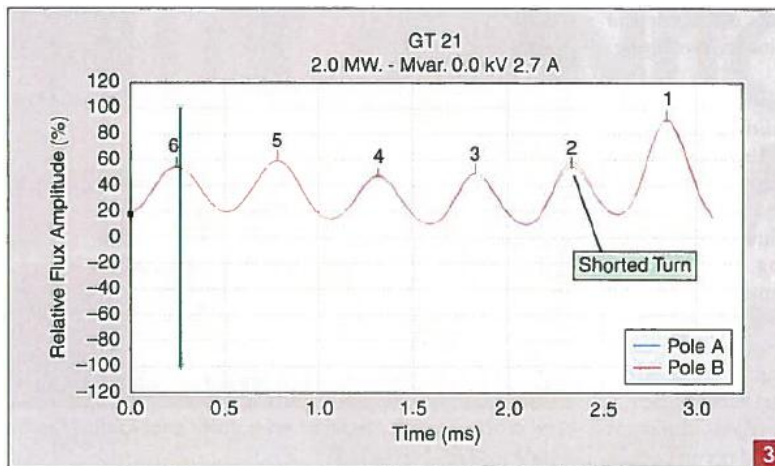
### Новые способы измерения магнитного потока

Помимо усовершенствованной конструкции датчика, были разработаны электроника и прикладное ПО второго поколения. Имеются ПО и электроника как для явнополюсных, так и для неявнополюсных машин. Прибор оснащен входами для датчиков магнитного потока различных типов; возможны три разных способа синхронизации: с помощью специального синхронизирующего маркера, установленного на валу, либо от входного напряжения питания переменного тока, либо от другого внешнего сигнала переменного тока в диапазоне 20-240 В. Этот



Портативный анализатор магнитного потока ротора (фото предоставлено Iris Power LP.)





**Shorted Turn** Короткозамкнутый виток

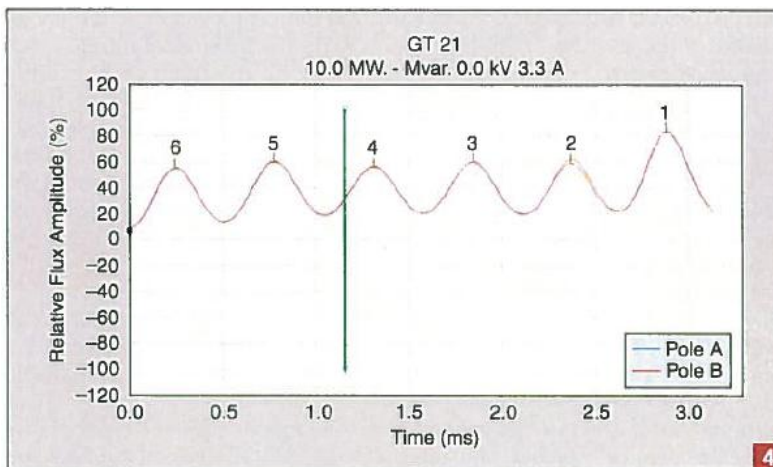
**Pole A** Полюс А

**Pole B** Полюс В

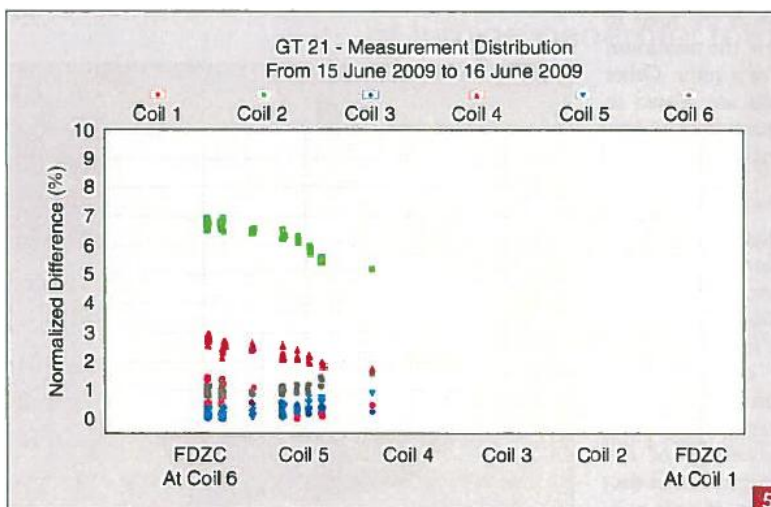
**Time (ms)** Время (мс)

**Relative Flux Amplitude (%)** Относительная амплитуда магнитного потока (%)

На графике показано сравнение сигналов магнитного потока набегающего полюса. Ось X – время, ось Y – нормализованный магнитный поток в процентах. FDZC находится вблизи обмотки 6 (зеленая линия), КЗ обнаружено в обмотке 2.



Сравнение полюса А с полюсом В, испытание под нагрузкой 10 МВт. Ось X – время, ось Y – нормализованный магнитный поток в процентах.



**Normalized Difference (%)** Нормализованная разность магнитных потоков (%)

Ось X – положение FDZC на роторе, ось Y – нормализованная разность магнитных потоков между полюсом А и полюсом В.

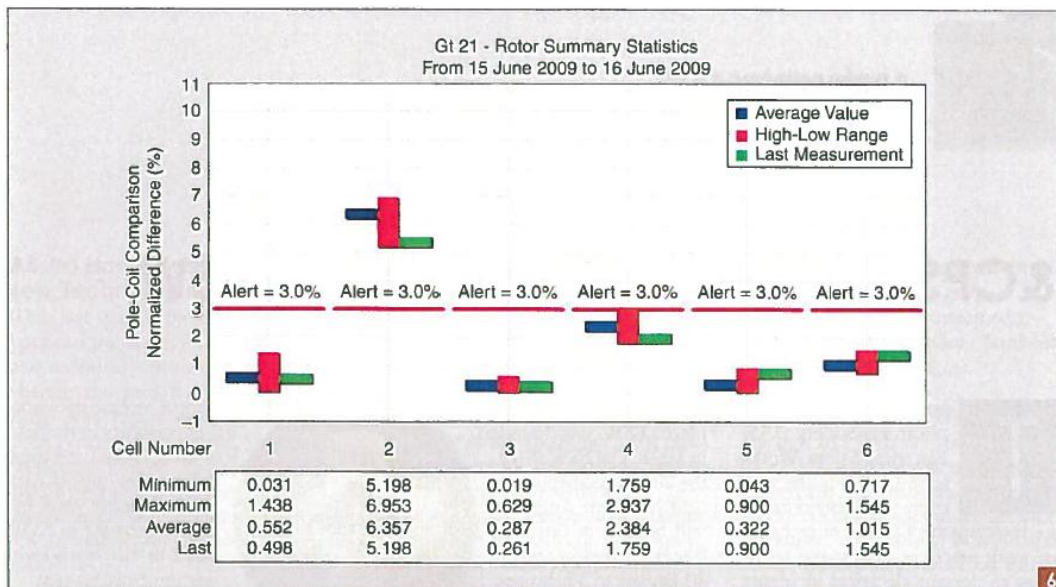
векторный сигнал используется для локализации короткозамкнутого полюса для последующего ремонта. Можно использовать как портативные приборы, так и стационарные системы для непрерывного мониторинга магнитного потока. В тех и других используется однотипная электроника на основе заказной вентиляционной матрицы, программируемой пользователем, обеспечивающей быстрый сбор данных с высокой частотой выборки. Благодаря высокой частоте выборки стало возможным использовать новые алгоритмы обнаружения короткозамкнутых витков. Для подключения к ПК могут использоваться различные протоколы обмена (USB или Ethernet). Для сбора данных могут использоваться синхронизируемые измерения в заданные пользователем интервалы времени, минимальная периодичность – одно измерение каждые 5 с. Этот метод очень полезен для автоматического сбора данных при быстро изменяющейся переменной нагрузке (рис. 2).

Все собранные данные измерений сохраняются во внутренней памяти прибора и могут быть выгружены в базу данных Microsoft Access; данные находятся в различных папках, соответствующих испытываемым станциям и машинам. Хотя используются разные способы сбора данных, в отличие от традиционных методик, не требуется выполнять приборные измерения при разных значениях нагрузки генератора, чтобы достичь максимальной чувствительности к межвитковым КЗ.

Сбор данных сигналов с высоким разрешением и использование нескольких алгоритмов анализа значительно повысили достоверность обнаружения межвитковых КЗ даже при значениях нагрузки, отличающихся от оптимальных. Кроме того, результаты анализа могут быть представлены различными способами, что облегчает анализ тенденций (трендов) результатов измерений и индикацию сводных данных о роторе.

### Пример из практики

Одна из трудностей традиционных методик для обнаружения межвитковых КЗ заключается в обнаружении межвитковых КЗ при значениях нагрузки, которые не обеспечивают максимальную чувствительность. Максимальная чувствительность к магнитному потоку рассеяния обеспечивается вблизи нулевых значений основного магнитного потока. Чтобы добиться максимальной чувствительности обнаружения межвитковых КЗ, следует изменить положение перехода магнитного потока через нуль (flux density zero crossing - FDZC) путем изменения нагрузки на машину (традиционная методика измерений). Это требование может оказаться серьезным препятствием для обнаружения межвитковых КЗ в агрегатах с базисной нагрузкой с большим числом обмоток, которые постоянно работают при полной нагрузке или почти при полной нагрузке. При полной нагрузке



- Average Value Среднее значение
- High-Low Range Диапазон Высокий - Низкий
- Last Measurement Последнее измерение

**Alert Тревога**

**Cell Number Номер ячейки (обмотки? – прим. перев.)**

**Minimum Минимум**

**Maximum Максимум**

**Average Среднее**

**Last Последнее**

**Pole-Coil Comparison Сравнение полюсов - обмоток**

**Normalized Difference (%) Нормализованная разность (%)**

**Ось X – номер обмотки ротора, ось Y – нормализованная разность магнитных потоков между полюсом А и полюсом В. Набор результатов, все обмотки ротора в зависимости от времени.**

точка FZDC находится ближе к обмотке 2 или 3 (ближе к оси полюса), и традиционным методам не хватало чувствительности для достоверного обнаружения короткозамкнутых витков при большом числе обмоток. В то же время, если имеются КЗ в обмотке с меньшим номером, вследствие конструктивных ограничений невозможно переместить FZDC ближе к обмотке 1 и надлежащим образом оценить эту обмотку.

С помощью нового прибора был проведен ряд испытаний, и новые алгоритмы анализа показали высокую чувствительность к короткозамкнутому витку в обмотке с наибольшим номером на двухполюсном турбогенераторе 13,8 кВ, 20 МВА при различных режимах нагрузки. На рис. 3 показано сравнение ведущих пазов полюса А и полюса В при минимально возможной нагрузке: 2 МВт. На рис. 4 хорошо виден короткозамкнутый виток в обмотке 2, хотя FZDC находится далеко от этой обмотки. На рис. 5 показано сравнение ведущих пазов полюса А и полюса В при нагрузке, максимально возможной при испытании. На обоих графиках вертикальная зеленая линия означает положение FZDC: между обмотками 5 и 4 при нагрузке 10 МВт и вблизи обмотки 6 при отсутствии нагрузки. По сравнению с обмотками противоположных полюсов, предполагается, что обмотки без короткозамкнутых витков должны давать одинаковые пиковые амплитуды.

Нормализованная разность в процентах (показанная по оси Y) между двумя полюсами для различных положений FZDC (показанных по оси X) для всех обмоток показана на рис. 5. Обмотка 2, обозначенная зеленым квадратом, показала нормализованную разность между полюсами выше 5% при всех условиях нагрузки. В то же время все другие обмотки не показывали разность между полюсами А и В более 3%. Таким образом, эта система имеет равномерную чувствительность к КЗ в обмотке 2 при различных значениях нагрузки, что невозможно обеспечить при традиционных методах измерений. Следует отметить, что в случае применения новых алгоритмов, разность несколько выше в положении FZDC с наименьшей чувствительностью, вблизи обмотки 6, а не в положении FZDC с наибольшей чувствительностью в этом испытании, вблизи обмотки 4.

На рис. 6 показана разность между полюсами А и В для всех обмоток за некоторый период времени для всех нагрузок, возможных в течение испытаний.

**Выводы**

Был разработан датчик магнитного потока на гибкой печатной плате, обеспечивающий высокую чувствительность к межвитковым КЗ в обмотках. Датчик легко установить для измерения основного магнитного потока в воздушном зазоре. В сочетании с портативным или стационарным анализатором, работающим в условиях эксплуатации, использующим специальные фирменные алгоритмы, этот датчик позволяет значительно повысить чувствительность к обнаружению КЗ в роторе. Благодаря этому стало возможным обнаружение короткозамкнутых витков даже при условиях нагрузки машины, далеких от идеальных.

**Литература**

- [1] D. R. Albright, "Inter-turn short-circuit detector for turbine-generator rotor windings," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-90, Mar./Apr. 1971.
- [2] D. R. Albright, D. J. Albright, and J. D. Albright, "Generator fields winding shorted turn detection technology," in *Proc. IRMC*, May 1999.
- [3] M. P. Jenkins and D. J. Wallis, "Rotor shorted turns: Description and utility evaluation of a continuous on-line monitor," in *Proc. EPRI Predictive Maintenance and Refurbishment Conf.*, Dec. 1993.
- [4] A. Whittle, "Continuous rotor flux monitoring," in *Proc. 10th EPRI Generator Workshop*, Aug. 2007.
- [5] J. Dehaan, M. Jacobs, and U. Milano, "Flexible printed circuit magnetic flux probe," U.S. Patent 6 466 009, Oct. 15, 2002.

*Младен Сасич, С.Р. Кэмпбелл, и Блейк Ллойд (blloyd@irispower.com) являются сотрудниками Iris Power LP, Миссисауга, Канада. Сасич и Ллойд - старшие члены IEEE. Эта статья первоначально была представлена как "Flux Monitoring for Online Condition Monitoring of Turbine Generator Rotors" на конференции IEEE по целлюлозно-бумажной промышленности, 2010 г.*