

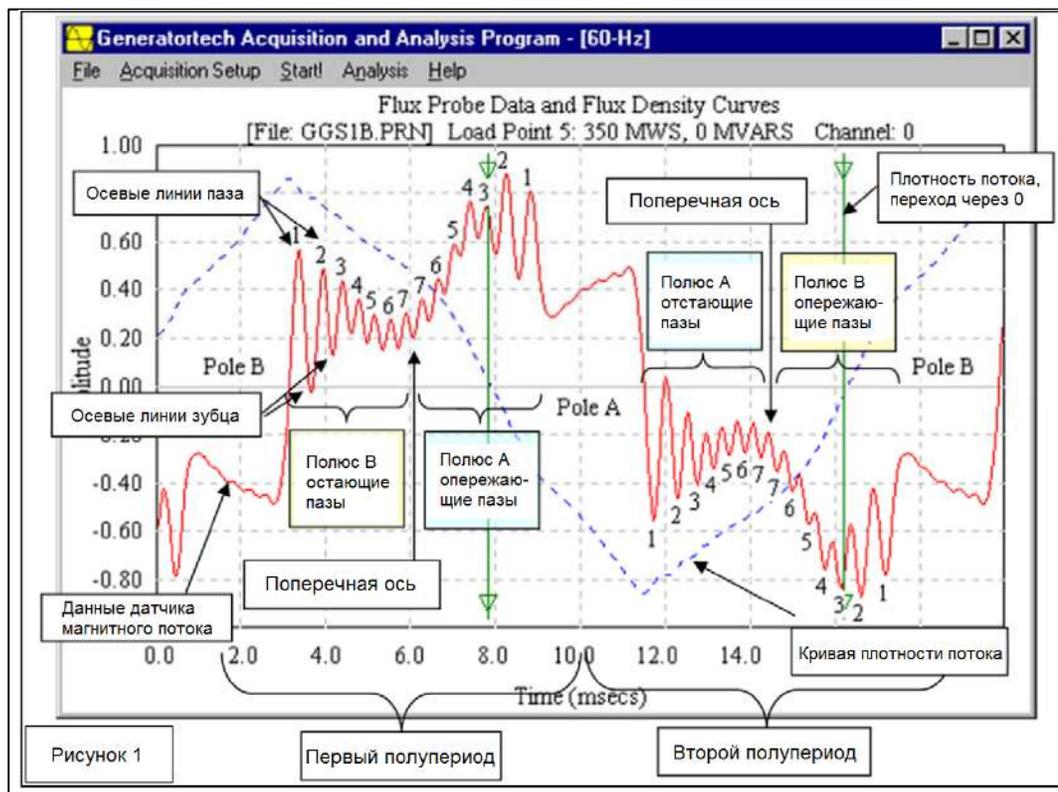
GENERATORTECH, INC.

Определение короткозамкнутых витков обмотки ротора; потребность в записи широкого спектра нагрузок

Тест с помощью датчика магнитного потока определяет наличие короткозамкнутых витков обмотки ротора путем измерения магнитного потока, создаваемого каждой катушкой в роторе. Величина магнитного потока, создаваемого катушкой, определяется величиной тока возбуждения машины и числом активных витков в катушке (ампер-витки или магнитодвижущая сила, МДС). Если присутствует короткозамкнутый виток, число активных витков в катушке уменьшается, и результирующее уменьшение магнитного потока, создаваемого катушкой, может быть определено путем анализа формы сигнала датчика.

Однако для правильной идентификации короткозамкнутых витков во всех катушках ротора работающего генератора сигналы датчика должны регистрироваться в широком диапазоне нагрузок генератора. Анализ данных, поступающих от датчика, только при одной нагрузке может привести к двум типам ошибок:

1. **Ложные отрицательные:** замыкания во всех витках катушки не могут быть достоверно обнаружены при одной нагрузке. Это связано с магнитным насыщением и эффектами магнитной модуляции. Например, короткозамкнутые витки в самых больших катушках ротора не видны в формах сигнала датчика при полной нагрузке. Аналогично, короткозамкнутые витки в самых малых катушках ротора не видны в формах сигнала датчика при низких нагрузках. Необнаружение короткозамкнутых витков является ложной отрицательной ошибкой.
2. **Ложные положительные:** из-за небольших различий между геометрией паза ротора и клина ротора, а также их материалами, различия в модуляции магнитного потока могут приводить к ложной индикации короткозамкнутых витков (ложные срабатывания), что является результатом различий между пиками сигналов. Индикация ложных короткозамкнутых витков ведет себя противоположно индикации истинных короткозамкнутых витков относительно изменений нагрузки. Например, нагрузка, которая имеет высокую чувствительность для обнаружения истинных короткозамкнутых витков в определенной катушке, будет показывать низкую чувствительность для сообщения ложных короткозамкнутых витков этой же катушки.



Generatortech, Inc., отчет по короткозамкнутым виткам

Специфическая форма сигнала датчика показывает максимальную чувствительность для обнаружения короткозамкнутых витков катушки и минимальную чувствительность для сообщений о ложных короткозамкнутых витках в этой же катушке, когда позиция перехода через ноль кривой плотности потока (ПНКП-позиция) выравнивается с пиком паз катушки. Кривая плотности потока вычисляется по форме сигнала датчика и представляет собой график изменения напряженности магнитного поля вокруг ротора в воздушном зазоре генератора (см. рис. 1). ПНКП-позиция представляет собой точку, в которой минимизированы эффекты магнитного насыщения и модуляции паз. Паз катушки, совмещенный с ПНКП-позицией, отражает максимальную чувствительность для обнаружения короткозамкнутых витков катушки и минимальную чувствительность для сообщений о ложных короткозамкнутых витках. ПНКП-позиция изменяется как с активной, так и с реактивной мощностью генератора, и, изменяя эти коэффициенты нагрузки, ПНКП-позицию обычно можно совместить с каждой катушкой ротора. Сигналы датчика магнитного потока, записанные при низких нагрузках генератора, приведут к ПНКП-позициям, которые находятся вблизи наибольших катушек ротора, и, по мере увеличения нагрузки на генератор, ПНКП-позиции будут смещаться вправо, к наименьшим катушкам ротора.

Например, чтобы определить, имеет ли катушка № 2 короткозамкнутые витки, нужно выбрать сигнал датчика при высокой нагрузке, ПНКП-позиция которого совмещена с катушкой 2. Это максимизирует индикацию короткозамкнутых витков и минимизирует ложную индикацию короткозамкнутых витков для катушки № 2. Такой же сигнал, полученный при высокой нагрузке, будет иметь низкую чувствительность для обнаружения короткозамкнутых витков и высокую чувствительность для сообщений о ложных короткозамкнутых витках в самых крупных катушках ротора. Для получения точной информации о наличии короткозамкнутых витков в самых крупных катушках ротора необходимы записи сигнала датчика при малой нагрузке.

Generatortech имеет данные датчиков магнитного потока от тысяч роторов, которые регистрировались на протяжении более 20 лет. Требование широкого диапазона нагрузок для измерений было продемонстрировано в сотнях практических примеров. Во всех этих сотнях случаев запись только при одной нагрузке привела бы к ложным отрицательным, ложным положительным ошибкам, или к обоим видам вместе. Данный документ включает шесть практических примеров.

Практический пример № 1

В первом практическом примере рассматривается генератор мощностью 120 МВА с витковым замыканием в катушке № 8, полюс А (катушка 8А). Этот короткозамкнутый виток очень четко определяется в режиме низкой нагрузки (см. рис. 2А) и не определяется в режиме высокой нагрузки (см. рис. 2В). Если бы этот генератор был протестирован только при высокой нагрузке, витковое замыкание катушки 8А было бы упущено.

Для этого генератора не обнаружено каких-либо существенных ложных положительных результатов.

Примечание: на этих рисунках показаны наложения пиков пазов катушки для обоих полюсов. Витковое замыкание на полюсе будет отображаться с амплитудой меньшей, чем у нормального пика. ПНКП-позиция показана на этих графиках как вертикальная зеленая линия, и катушка, которая совмещена с ней, будет иметь максимальную чувствительность для обнаружения короткозамкнутых витков катушки и минимальную чувствительность для сообщений о ложных короткозамкнутых витках.

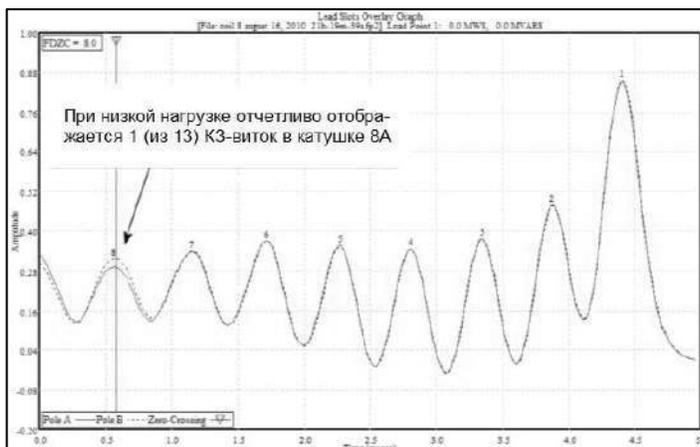


Рисунок 2А – При низкой нагрузке (ПНКП-позиция - 8,0), отчетливо отображается 1 (из 13) КЗ-виток в катушке 8А

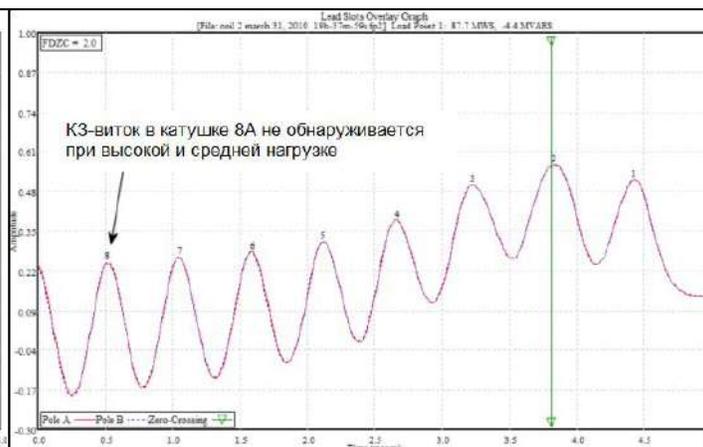


Рисунок 2В – При высокой нагрузке (ПНКП-позиция - 2,0), КЗ-виток в катушке 8А не обнаруживается

Generatortech, Inc., отчет по короткозамкнутым виткам

Практический пример № 2

Второй практический пример показывает ложную индикацию короткозамкнутых витков на генераторе аналогичном генератору из примера № 1. В данном примере короткозамкнутые витки обнаружены в катушках № 4-6 как при максимальной, так и при минимальной зарегистрированной нагрузке (см. рис. 3А). Это - нагрузки, при которых ПНКП-позиции наиболее удалены от этих катушек. Однако при средних нагрузках с ПНКП-позициями, близкими к этим катушкам, никаких признаков короткозамкнутых витков не было обнаружено ни в одной из этих катушек (см. рис. 3В). Если бы этот генератор был протестирован только при полной нагрузке или без нагрузки, было бы сообщено о трех ложных короткозамкнутых витках.

Это - классический пример различий модуляции, вызывающих сообщения о ложных короткозамкнутых витках в пиках катушки вдали от ПНКП-позиции. Важно отметить, что генераторы в практических примерах № 1 и № 2 были аналогичными, и что весьма небольшие различия, которые могли вызвать различия в модуляции, приводящие к ложным сообщениям, не могли быть заранее предсказаны. Эти генераторы были частью парка из 12 идентичных машин, и 6 из них показали ложные короткозамкнутые витки в разных катушках (речь идет об обычных явлениях, которые компания Generatortech наблюдала за 20 лет работы).

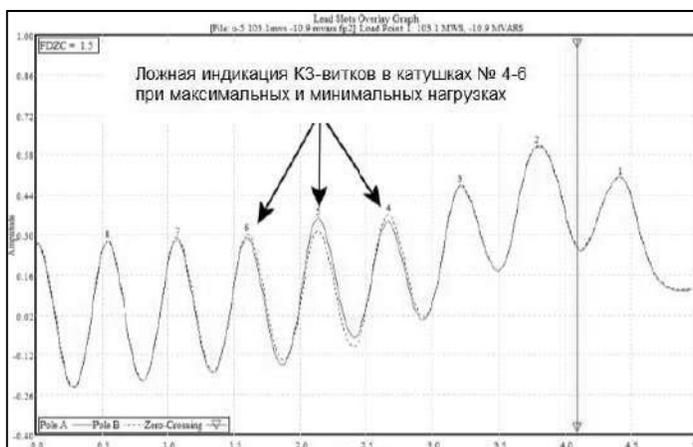


Рисунок 3А – При максимальных и минимальных нагрузках в катушках № 4-6 обнаружена ложная индикация КЗ-витков



Рисунок 3В – При средних нагрузках, где чувствительность для обнаружения КЗ-витков в катушках № 4-6 максимальная, в этих катушках не наблюдалось признаков КЗ-витков

Практический пример № 3

В третьем практическом примере показан мощный (700 МВА) генератор с двумя короткозамкнутыми витками в обмотке ротора. При средней/низкой нагрузке (159 МВт, - 41 МВА_р, ПНКП-позиция - 6,0) короткозамкнутый виток в катушке 6В очевиден, в то время как короткозамкнутый виток в катушке 3В не обнаруживается (см. рис. 4А). Однако при большой нагрузке (698 МВт, 52 МВА_р, ПНКП-позиция - 3,0) короткозамкнутый виток в катушке 6В не обнаруживается, а короткозамкнутый виток в катушке 3В теперь очевиден (см. рис. 4В).

Этот пример показывает, что тест при полной нагрузке пропустил бы короткозамкнутый виток катушки 6В, а тест при средней/низкой нагрузке пропустил бы короткозамкнутый виток катушки 3В (ложные отрицательные ошибки). Таким образом, ясно, что тестирование только при одной высокой нагрузке или при одной низкой нагрузке недостаточно для обнаружения всех истинных короткозамкнутых витков в роторе.

Generatortech, Inc., отчет по короткозамкнутым виткам

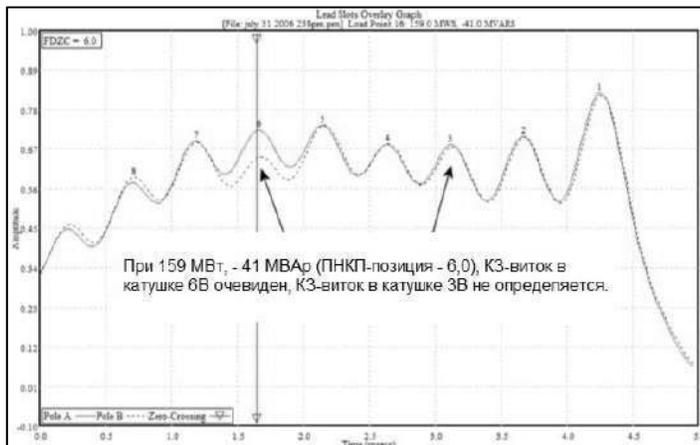


Рисунок 4А – При средней/низкой нагрузке (ПНКП-позиция - 6,0), КЗ-виток в катушке 6В очевиден (1 из 8), КЗ-виток в катушке 3В не определяется

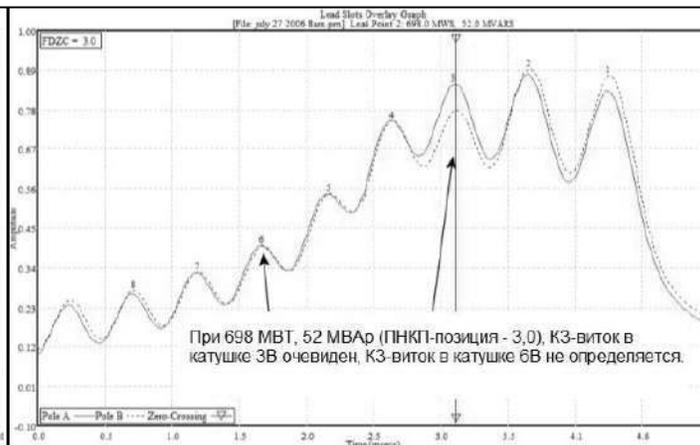


Рисунок 4В – При высокой нагрузке (ПНКП-позиция - 3,0), КЗ-виток в катушке 3В очевиден (1 из 8), КЗ-виток в катушке 6В не определяется

Практический пример № 4

В этом примере показан двухполюсный генератор мощностью 80 МВА, который показывает ложные короткозамкнутые витки как при низких, так и высоких нагрузках для тех катушек, которые находятся дальше всего от ПНКП-позиции (см. рис. 5А и 5В). В катушках, близких к ПНКП-позиции, ложная индикация короткозамкнутых витков сводится к минимуму или устраняется.

В этом случае тестирование только при полной нагрузке привело бы к появлению ложной индикации короткозамкнутых витков для катушек 6А, 7А и 8А. Тестирование только при низкой нагрузке привело бы к появлению ложной индикации короткозамкнутых витков для катушек 1В и 2А. Таким образом, видно, что тестирования только при полной нагрузке или только при низкой нагрузке недостаточно для устранения всех ложных индикаций короткозамкнутых витков в роторе.

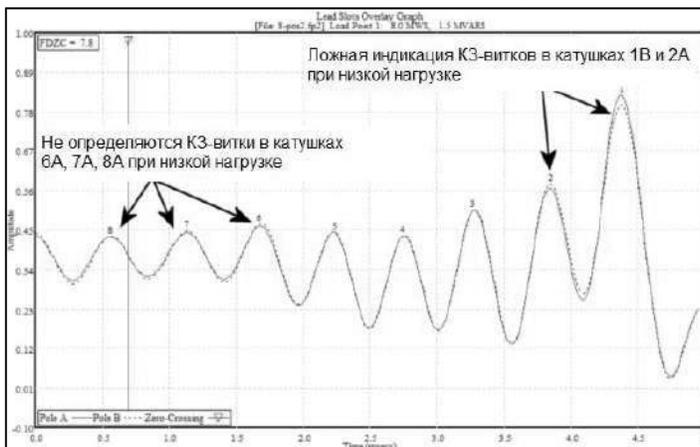


Рисунок 5А – При низкой нагрузке (ПНКП-позиция - 7,8), имеется ложная индикация КЗ-витков в катушках 1В и 2А, КЗ-витки в катушках 6А, 7А, 8А не определяются

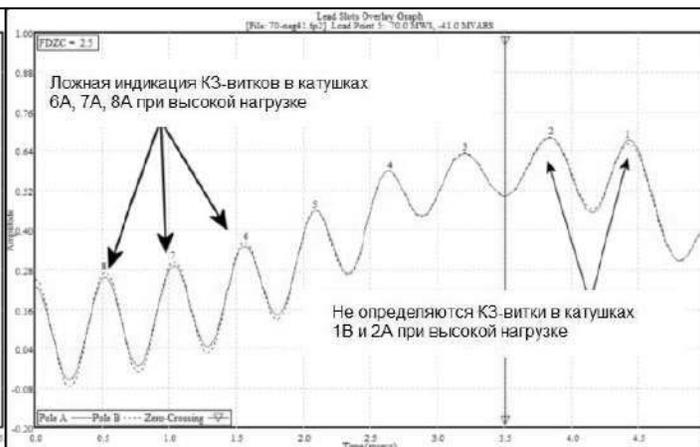


Рисунок 5В – При высокой нагрузке (ПНКП-позиция - 2,5), имеется ложная индикация КЗ-витков в катушках 6А, 7А, 8А. КЗ-витки в катушках 1В, 2А не определяются

Generatortech, Inc., отчет по короткозамкнутым виткам

Практический пример № 5

В этом примере показан мощный (1300 МВА) четырехполюсный генератор АЭС с короткозамкнутым витком в катушке 4А. Короткозамкнутый виток в катушке 4А ясно виден на форме сигнала датчика, записанной при низкой нагрузке (132 МВт, 39 МВАр, ПНКП-позиция - 4,0; см. рис. 6А). Однако при полной нагрузке (1025 МВт, 167 МВАр, ПНКП-позиция - 2,1) короткозамкнутый виток в катушке 4А не был показан столь очевидно. Фактически, при этой нагрузке ложный короткозамкнутый виток в катушке 3А показан даже яснее, чем истинный короткозамкнутый виток в катушке 4А (см. рис. 6В).

Тестирование только при полной нагрузке могло привести к ложной индикации короткозамкнутого витка в катушке 3А и отсутствию индикации истинного короткозамкнутого витка в катушке 4А (ложная положительная и ложная отрицательная ошибки).

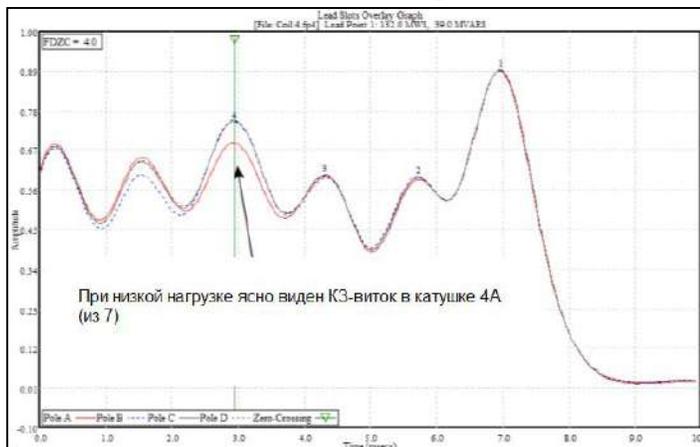


Рисунок 6А – При низкой нагрузке (132 МВт, 39 МВАр, ПНКП-позиция - 4,0), ясно виден КЗ-виток в катушке 4А

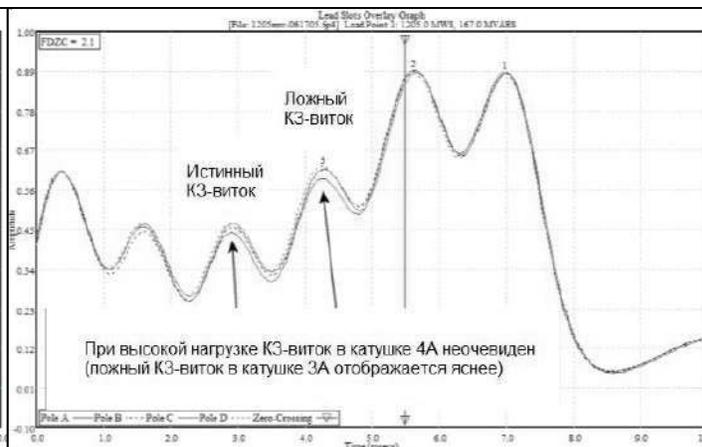


Рисунок 6В – При высокой нагрузке (1205 МВт, 167 МВАр, ПНКП-позиция - 2,1), КЗ-виток в катушке 4А неочевиден (ложный КЗ-виток в катушке 3А отображается яснее)

Практический пример № 6

В этом примере показан генератор, в обмотке ротора которого при отсутствии нагрузки отображаются два короткозамкнутых витка. Когда генератор работает без нагрузки (0 МВт, 0 МВАр, ПНКП-позиция - между двумя наибольшими катушками ротора), ток статора отсутствует, а магнитное поле воздушного зазора создается только током возбуждения. Это создает симметричный сигнал датчика магнитного потока, и любые истинные короткозамкнутые витки, которые отображаются в опережающих пазах при отсутствии нагрузки, будут так же отображаться в отстающих пазах (что неверно для нагруженного генератора).

Отсутствие симметрии в показаниях в режиме без нагрузки между опережающими и отстающим пазами являются верным признаком того, что индикация короткозамкнутых витков является результатом различий в модуляции и не показывает истинных короткозамкнутых витков. В этом случае (см. рис. 7) было два больших ложных короткозамкнутых витка, при этом меньший из них кратковременно показывался в опережающем пазу катушки 5 (но не в отстающем пазу этой же катушки), а больший - в отстающем пазу катушки 1 (но не в опережающем пазу этой же катушки).

При измерениях при полной нагрузке (ПНКП-позиция - 2,0) прибор не показал короткозамкнутых витков в катушке 1, но снова показал большой короткозамкнутый виток в катушке 5В (2 из 14). Тестирование только при полной нагрузке привело бы к ложной индикации короткозамкнутых витков в катушке 5В (ложная положительная и ложная отрицательная ошибки).

Generatortech, Inc., отчет по короткозамкнутым виткам

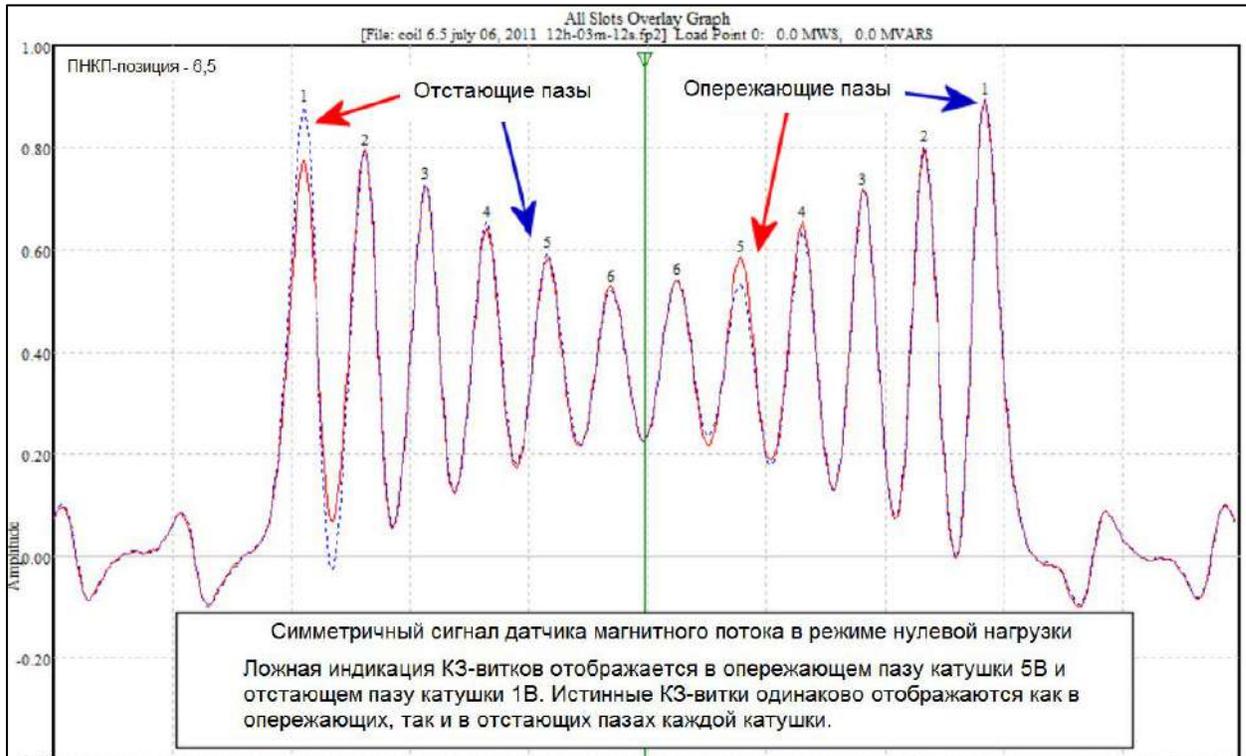


Рисунок 7 – Форма сигнала датчика без нагрузки абсолютно симметрична относительно поперечной оси (ПНКП-позиция - между двумя наибольшими катушками ротора, в данном случае - 6,5). При симметричном сигнале любые истинные КЗ-витки будут одинаково отображаться как в опережающих, так в отстающих пазух каждой катушки. Этот сигнал очень ясно показывает два ложных КЗ-витка - в опережающем пазу катушки 5 и в отстающем пазу катушки 1.

Вывод

Индикация короткозамкнутых витков будет увеличиваться по мере приближения ПНКП-позиции данной нагрузки к поврежденной катушке. Максимальная индикация короткозамкнутых витков будет поступать при нагрузке, ПНКП-позиция которой близка к данной катушке. Для большинства истинных короткозамкнутых витков существуют такие нагрузки, ПНКП-позиции которых находятся настолько далеко от поврежденной катушки, что обнаружение короткозамкнутых витков будет невозможным. Тестирование в широком диапазоне нагрузок гарантирует, что истинные короткозамкнутые витки не пропущены.

Напротив, ложная индикация короткозамкнутых витков будет увеличиваться, поскольку ПНКП-позиция удаляется от поврежденной катушки. Нагрузка, ПНКП-позиция которой выровнена по катушке, минимизирует или устраняет любые ложные показания для этой катушки. Таким образом, полный набор тестовых данных, которые включают в себя сигналы датчика магнитного потока, записанных в широком диапазоне нагрузок генератора, позволяет каждому сообщению о короткозамкнутом витке быть правильно идентифицированным как ложное или истинное. Из-за непредсказуемого характера очень малых физических различий, которые приводят к ложной индикации короткозамкнутых витков, нет никакого метода анализа, который мог бы правильно идентифицировать такую индикацию с использованием только одного записанного сигнала датчика магнитного потока.

Это необходимое условие неизменно соблюдается в тысячах генераторов, которые Generatortech протестировал за время более 20 лет. Оно в равной степени справедливо и для малых двухполюсных генераторов, и для четырехполюсных генераторов АЭС мощностью 1400 МВА. Компания Generatortech разработала программное обеспечение, которое упрощает требования записи широкого диапазона данных нагрузки, позволяя автоматическую проверку генераторов при увеличении или снижении нагрузки. Оборудование Generatortech автоматически записывает данные согласно изменению нагрузки. После прекращения колебаний нагрузки автоматически записанные тестовые данные могут быть быстро проанализированы, чтобы определить наличие короткозамкнутых витков в обмотке ротора. При наличии большого количества сигналов, записанных при разных нагрузках, вы можете быть уверены, что ложные положительные и ложные отрицательные ошибки исключены.