

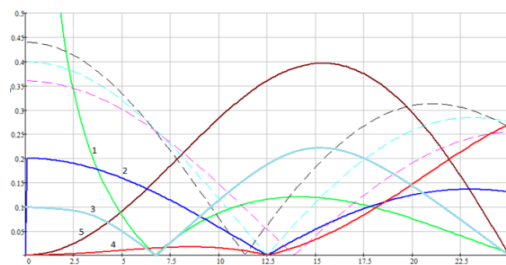
$$\frac{\delta|U_n|}{\delta T_0} = \frac{2E\omega}{\pi} \operatorname{sign}\left(\cos\frac{n\omega T_0}{2}\right) \times \sin\frac{n\omega T_0}{2} \left| \sin\frac{n\omega t_n}{2} \right| \left| \cos\frac{n\omega t_3}{2} \right|, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta|U_n|}{\delta\omega} = & \frac{2E}{\pi} \left( t_n \cos\frac{n\omega t_n}{2} \cos\frac{n\omega T_0}{2} \times \right. \\ & \times \cos\frac{n\omega t_3}{2} - T_0 \sin\frac{n\omega t_n}{2} \sin\frac{n\omega T_0}{2} \times \\ & \times \cos\frac{n\omega t_3}{2} - t_3 \sin\frac{n\omega t_n}{2} \cos\frac{n\omega T_0}{2} \sin\frac{n\omega t_3}{2} \left. \right) \times \\ & \times \operatorname{sign}\left(\sin\frac{n\omega t_n}{2} \cos\frac{n\omega T_0}{2} \cos\frac{n\omega t_3}{2}\right). \end{aligned} \quad (11)$$

Анализ чувствительности проведенный с помощью ПО Mathcad представлен на рис. 3

Учитывая, что при формировании импульсов с помощью существующих микроконтроллерных средств, можно добиться нестабильности по амплитуде до 0,01 %, а нестабильность временных параметров менее 0,0001 %, что ниже нестабильности опорной частоты анализируемых сигналов, которая может составлять до 10 %, то все дальнейшие действия будут направлены для снижения погрешности связанных с нестабильности частоты сигнала. Так из уравнения (11) для достижения минимальной чувствительности к  $\omega$  с допущением, что  $T_0 = 2t_n$  (скважность импульсов в двойной импульсной последовательности равен двум), параметры последовательности импульсов определяются из зависимости:

$$t_w \operatorname{tg} \frac{n\omega t_w}{2} = \frac{T_0}{2 \operatorname{tg} \frac{n\omega T_0}{4}} - T_0 \operatorname{tg} \frac{n\omega T_0}{2}. \quad (12)$$



1 – к частоте следования импульсов  $\omega$ ; 2 – к длительности импульсов  $t_n$ ; 3 – к амплитуде сформированных импульсов  $E$ ; 4 – к периоду импульсов в последовательности  $T_0$ ; 5 – к времени задержки в импульсной последовательности  $t_3$

Рисунок 3 – Кривые чувствительности амплитудно-частотного спектра к изменению параметров импульсной последовательности

### Литература

1. Чумаков, С. А. Определение начальных фаз высших гармонических составляющих тока нелинейной электромагнитной нагрузки / С. А. Чумаков, Ю. В. Суходолов, А. Н. Малашин // Вестник военной академии РБ. – 2016. – Т. 50, № 1. – С. 144–152.
2. Способ определения времени задержки между двумя периодическими последовательностями импульсов: патент ВУ 19225С1 / Ю. В. Суходолов, О. И. Киш, Л. П. Крученко. – Опубл. 30.06.2015.
3. Харкевич, А. А. Спектры и анализ / А. А. Харкевич. – Изд. 6. – URSS. – 2018. – 240 с.

УДК 621.396.96

## ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ТОКУ ХОЛОСТОГО ХОДА

Исаев А.В., Суходолов Ю.В., Сушко А.С., Черняк А.С.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Одна из частых причин преждевременных отказов электрических машин это пробой межвитковой изоляции. Существующие методы выявления дефектов чаще всего основаны на измерении активного сопротивления между витками в обмотках. Такой подход в производственных условиях не всегда оптимальным. По этому в данной работе рассматривается задача построения измерительной системы для диагностики состояния обмоток электрических машин, который обеспечит возможность косвенного определения дефектов по спектру намагничивающего тока холостого хода, что позволит снизить трудоемкость диагностирования при сохранении высокой достоверности.

**Ключевые слова:** диагностика обмоток электрических машин, погрешность от нестабильности параметров, чувствительность к изменениям параметров, спектр намагничивающего тока холостого хода.

## MEASURING SYSTEM FOR DIAGNOSTIC STATE OF WINDING OF ELECTRIC MACHINES BY IDLE CURRENT

Isaev A., Suchodolov U., Sushko A., Cherniak A.

Belarusian National Technical University  
Minsk, Belarus

**Abstract.** One of the most common causes of premature failures of electrical machines is breakdown of interturn insulation. The existing methods for detecting defects are most often based on measuring the active resistance between the turns in the windings. This approach in a production environment is not always optimal. Therefore, in this work, the problem of constructing a measuring system for diagnosing the state of windings of electrical ma-

chines is considered, which will provide the possibility of indirect determination of defects by the spectrum of the magnetizing no-load current, which will reduce the complexity of diagnostics while maintaining high reliability.

**Key words:** diagnostics of windings of electrical machines, error from parameter instability, sensitivity to parameter changes, spectrum of no-load magnetizing current.

Адрес для переписки: Исаев А.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь  
e-mail: isaev0302@gmail.com

Одной из задач диагностики является своевременное определение неисправностей в различного класса электрических машинах – трансформаторах, двигателях постоянного и переменного тока и др. Основной неисправностью, на долю которой может выпадать до девяносто процентов от всех дефектов, это межвитковое замыкание. В настоящее время присутствует большое количество методик по контролю состояния обмоток, но у них есть существенный недостаток – они требуют демонтаж контролируемой электрической машины из технологического оборудования, ее разборку и установка на специальные испытательные стенды [1]. А эта процедура, с одной стороны, не всегда выполнима существующими на предприятиях средствами (отсутствие материальной базы, специалистов), так и сопряжена с остановкой технологических процессов на достаточно длительное время.

Согласно последним результатам исследования одним из способов контроля состояния обмоток может является оценка активного сопротивления между витками в обмотках при работе трансформатора в режиме холостого хода, путем косвенного определения дефектов обмоток электрических машин, по параметрам спектральных составляющих намагничивающего тока.

Одна из проблем такого способа диагностики состояния электрических машин – большая зависимость точности показаний от стабильности параметров электрической сети. По этому при таком подходе получение максимальной точности контроля электромагнитных систем по соотношению временных интервалов между гармониками холостого хода, в основном связано с уменьшением погрешностей от нестабильности частоты промышленной сети. Это возможно путем формирования специальных сигналов, структура спектрального спектра которых позволяет произвести эту компенсацию. Для этого используем организацию прерывистых последовательностей импульсов прямоугольной формы позволяющих с большей эффективностью и с наименьшей погрешностью произвести их формирование. Будем формировать прерывистую последовательность импульсов, представляющие из себя набор из двух пар импульсов сформированных в точках перехода через ноль сигнала первой и высших гармоник.

Структурную схему системы измерения можно представить в следующем виде (рис. 1).

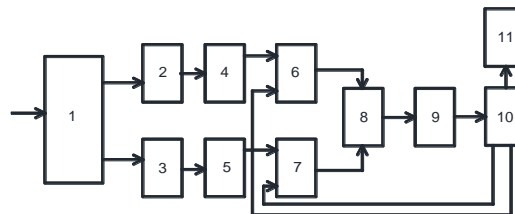


Рисунок 1 – Структура системы для измерения дефектов обмоток электрических машин

Измерительная система содержит регистрирующий прибор 1, фильтр низких 2 и высоких 3 частот, блоки компараторов 4 и 5, два блока формирователей импульсов 6 и 7, схему аналогового умножения (смеситель) 8, избирательное устройство 9, систему индикации и отображения результатов 11 и управляющее устройство 10.

Работа системы в виде диаграммы работы представлена на рис. 2 и выглядит следующим образом. Регистрирующий прибор 1 принимает сигнал (рис. 2, а), представляющий собой характерную кривую тока обмотки электрической машины и передает его на двухканальный блок фильтров 2 и 3, где по одному каналу выделяется спектр первой гармоники (рис. 2, б), а по второму суммарный спектр высших гармоник (рис. 2, в). Далее, с помощью блоков компараторов 4 и 5 выделяются характерные точки кривых спектра и эта информация передается на блоки формирователя импульсов 6 и 7, которые под управлением управляющего устройства 10, задающего основные временные параметры импульсов, формируют две независимые импульсные последовательности (рис. 2, г и 2, д). Затем эти импульсные последовательности посредством смесителя 8 сводятся в одну, которая представляет собой сложную комбинацию импульсов с заданными параметрами (рис. 2, е):  $T_0$  – период импульсной последовательности;  $t_{и}$  – длительность импульсов; и  $t_3$  – время задержки между импульсами в пачке. На избирательном устройстве 9 выделяется необходимая, максимально информативная гармоника (рис. 2, ж), по анализу которой можно судить о состоянии обмоток электрических машин. Вся текущая информация о проводимых измерениях, а так же о состоянии образцов выводится на систему индикации 11.

Оценим погрешность измерения временных параметров импульсной последовательности получаемой из анализа тока холостого хода обмотки трансформатора представленным методом.

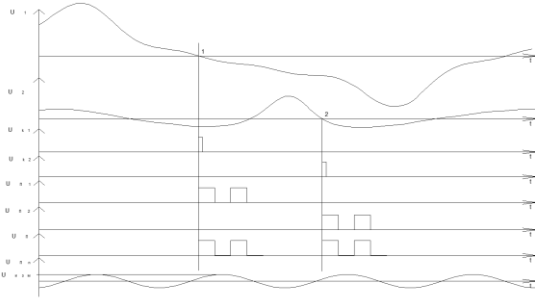
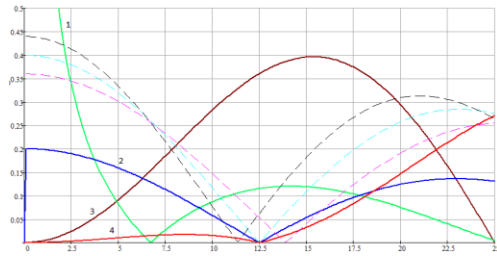


Рисунок 2 – Работа измерительной системы для измерения изменения временных параметров



1 – изменение несущей частоты  $\omega$ ; 2 – изменение длительности импульсов  $t_n$ ; 3 – изменение периода импульсов в последовательности  $T_0$ ; 4 – изменение времени задержки в импульсной последовательности  $t_3$

Рисунок 3 – Кривые чувствительности амплитудно-частотного спектра к изменению параметров импульсной последовательности

Выбрав за ноль начало первой импульсной последовательности и согласно [2] определим, что амплитуда  $n$ -ой спектральной составляющей имеет вид

$$|U_n| = \frac{4E}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega t_n}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right| \times \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right|. \quad (1)$$

Следовательно, абсолютная погрешность, образующаяся в результате некорректированных изменений параметров  $E$ ,  $\omega$ ,  $t_n$  и  $T_0$  определяется по величине полного дифференциала:

$$\begin{aligned} |\Delta U_{nE\omega t_n T_0}| &= \frac{\delta|U_n|}{\delta E} \Delta E + \frac{\delta|U_n|}{\delta \omega} \Delta \omega + \\ &+ \frac{\delta|U_n|}{\delta t_n} \Delta t_n + \frac{\delta|U_n|}{\delta T_0} \Delta T_0 + \frac{\delta|U_n|}{\delta t_3} \Delta t_3, \end{aligned}$$

где  $\Delta E$ ,  $\Delta \omega$ ,  $\Delta t_n$  и  $\Delta T_0$  – соответственно изменения параметров  $E$ ,  $\omega$ ,  $t_n$ ,  $T_0$ , а  $\Delta t_3$  изменения.

Чувствительность к изменениям параметров получили из выражения (1), проанализировав частные производные. Учтем, что с помощью цифровых средств, можно добиться неустойчивости по амплитуде порядка 0,01 %, а неустойчивость временных параметров может составлять менее 0,0001 %. При этом неустойчивость задающей частоты (в данном случае частоты сети) может достигать 1 % и более.

Далее, согласно проведенных исследований и реальных возможностей было определено, что наиболее оптимально использовать период импульсов в последовательности равное в пределах 0,01 от периода входного сигнала и скважности этих импульсов равное двум. Отсюда получились основные параметры импульсной последовательности: частота питающей сети 50 Гц ( $\omega = 314$ ), следовательно  $T = 20$  мсек,  $T_0 = 0,2$  мсек,  $t_n = 0,1$  мсек,  $E = 3,3$  В.

В соответствии с полученными параметрами был проведен анализ областей чувствительности (рис. 3) и определены гармоники, наименее чувствительные к флуктуации частоты полученной последовательности и при этом максимально чувствительную к изменению информационного параметра  $t_3$ . Это седьмая гармоника ( $n7$ ).

Из частных производных выражения (1) определим погрешности, связанные с флуктуацией неинформативных параметров  $|\Delta U_{E\omega t_n T_0}|$ , учитывая, что:  $\Delta E = 0,001$ ;  $\Delta \omega = 3,14$ ;  $\Delta t_n = \Delta T_0 = 0,00001$ , информативный параметр  $t_3 = 4$ ,  $T_0 = 0,8$  мсек.

Следовательно,

$$\begin{aligned} |\Delta U_{E\omega t_n T_0}| &= \frac{d|U_n|}{dE} \Delta E + \frac{d|U_n|}{d\omega} \Delta \omega + \frac{d|U_n|}{dt_n} \Delta t_n + \\ &+ \frac{d|U_n|}{dT_0} \Delta T_0 = \left( \frac{4}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega t_n}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right| \right) \times \\ &\times \Delta E + \left( \frac{2E}{\pi} \left( \begin{array}{l} \left( \begin{array}{l} t_n \cos \frac{n\omega t_n}{2} \cos \frac{n\omega T_0}{2} \times \\ \times \cos \frac{n\omega t_3}{2} - T_0 \sin \frac{n\omega t_n}{2} \times \\ \times \sin \frac{n\omega T_0}{2} \cos \frac{n\omega t_3}{2} - \\ - t_3 \sin \frac{n\omega t_n}{2} \cos \frac{n\omega T_0}{2} \times \\ \times \sin \frac{n\omega t_3}{2} \end{array} \right) \times \\ \times \text{sign} \left( \sin \frac{n\omega t_n}{2} \cos \frac{n\omega T_0}{2} \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right) \end{array} \right) \right) \Delta \omega + \\ &+ \left( \frac{2E\omega}{\pi} \text{sign} \left( \sin \frac{n\omega t_n}{2} \cos \frac{n\omega t_n}{2} \left| \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right| \times \right) \right) \Delta t_n + \\ &+ \left( \frac{2E\omega}{\pi} \text{sign} \left( \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right) \sin \frac{n\omega T_0}{2} \left| \sin \frac{n\omega t_n}{2} \right| \times \right) \times \\ &\times \Delta T_0 = 6,63710^{-5}. \end{aligned}$$

Т.е. погрешность измерения, в том числе связанная с флуктуацией основных параметров импульсной последовательности будет составлять около 0,005 %.

#### Литература

1. Беспалов, В. Я. Электрические машины / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – М. : Академия, 2008. – 320 с.
2. Харкевич, А. А. Спектры и анализ / А. А. Харкевич. – Изд. 6. – URSS. – 2018. – 240 с.