

# ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

УДК 681.2.088

*А. Г. Дмитриенко, А. А. Трофимов, Д. И. Нефедьев*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСТРОВЫХ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

*A. G. Dmitrienko, A. A. Trofimov, D. I. Nefed'ev*

### SIMULATION TOOL OF ERRORS RASTER DISPLACEMENT SENSORS

**А н н о т а ц и я.** Проведено физическое моделирование инструментальных погрешностей растровых электромагнитных датчиков перемещений. Приведены описания установок для исследования комбинационных сопряжений растров и фотографии распределения магнитного поля в зазорах растровых электромагнитных датчиков перемещений.

**A b s t r a c t.** Conducted physical modeling instrument errors raster electromagnetic displacement sensors. The descriptions of plants for the study of combination of interfaces and raster images of magnetic field distribution in the gaps raster electromagnetic displacement sensors.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** датчики перемещений, растровое сопряжение, инструментальная погрешность, чувствительный элемент.

**K e y w o r d s:** displacement sensors, raster blending, instrumental error, the sensor element.

#### *Введение*

Важное место в общей номенклатуре первичных преобразователей занимают взаимоиндуктивные (трансформаторные) датчики, среди которых наибольшей метрологической надежностью в жестких условиях эксплуатации обладают растровые трансформаторные датчики перемещений. Это сравнительно новый класс датчиков, теория проектирования которых в настоящее время окончательно не сформировалась, в том числе и по оценке инструментальных погрешностей, вызванных отклонением формы и размеров элементов растрового сопряжения.

Одним из основных типов инструментальных погрешностей трансформаторных датчиков с торцевым сопряжением спирального и кольцевого растров являются погрешности, вызванные изменением рабочего зазора, отклонением от параллельности сопрягаемых поверхностей, несоосностью геометрической оси статора и оси вращения ротора [1].

При повороте ротора датчика на угол  $\alpha$  происходит изменение рабочего зазора между статором и ротором, приводящее к изменению значения магнитной проводимости на всех участках, охваченных обмотками считывания. При отсутствии перекосов изменение зазора приводит к равномерному уменьшению или увеличению выходного сигнала во всех обмотках, не влияющего на точность преобразования при выбранном амплитудно-логическом методе обработки.

В отличие от параллельного изменения рабочего зазора, когда сигналы во всех выходных обмотках изменяются равномерно, при непараллельности сопрягаемых поверхностей статора и ротора происходят одновременное уменьшение сигнала в одних обмотках и увеличение в других, приводящее к появлению инструментальной погрешности от перекоса. Если непараллельность вызвана неперпендикулярностью торца статора к оси вращения ротора, то ее последствия легко устраняются за счет введения подстроечных резисторов, выравнивающих выходные напряжения. Непараллельность, полученную за счет биения торцевой поверхности ротора, скомпенсировать подобным образом не представляется возможным, поэтому при разработке чувствительного элемента (ЧЭ) необходимо стремиться к получению минимальных торцевых биений ротора (выбор точных подшипников, подрезка торца в собранном состоянии, возможность регулирования зазора в процессе сборки и т.п.).

Из рассмотренных в [1] видов отклонений наибольшее влияние на погрешность преобразования оказывает несоосность геометрических осей статора и ротора, которую необходимо учитывать как при изготовлении деталей, так и при сборке ЧЭ.

Для расчета выходной ЭДС представим индукцию в зазоре

$$B(x, y) = \frac{d\Phi}{dS} = F(x, y, t) \cdot \lambda(x, y, \epsilon), \quad (1)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток;  $F(x, y, t)$  – магнитодвижущая сила (МДС);  $\lambda(x, y, \epsilon)$  – текущая магнитная проводимость.

Интегрируя выражение (1), получим значение магнитного потока:

$$\Phi = \iint_S F(x, y, t) \cdot \lambda(x, y, \epsilon) dx dy, \quad (2)$$

где  $S$  – контур ЧЭ.

Согласно закону электромагнитной индукции

$$e = -\frac{d\psi}{dt}, \quad (3)$$

так как  $\psi = W_2 \frac{d\Phi}{dt}$ , где  $W_2$  – число витков вторичной обмотки, тогда

$$e = -W_2 \cdot \frac{d}{dt} \left[ \iint_S F(x, y, t) \cdot \lambda(x, y, \epsilon) dx dy \right]. \quad (4)$$

Функцию  $F(x, y, t)$  в большинстве случаев можно представить в виде

$$F(x, y, t) = F_0(x, y) \cdot f_0(t). \quad (5)$$

С учетом (5) выражение (4) примет вид

$$e = -W_2 \cdot \frac{df_0(t)}{dt} \cdot \iint_S F_0(x, y) \cdot \lambda(x, y, \epsilon) dx dy, \quad (6)$$

где  $-W_2 \cdot \frac{df_0(t)}{dt}$  определяет временной закон модуляции потока возбуждения;  $F_0(x, y)$  характеризует распределение МДС по зазору, а  $\lambda(x, y, \epsilon)$  описывает текущую проводимость зазора. Выражение (6) можно использовать непосредственно для расчетов простейших растровых

трансформаторных датчиков перемещений при пренебрежении сопротивлением магнитопровода.

При условии постоянства пространственного распределения МДС в пределах контура чувствительного элемента выходная ЭДС будет определяться текущим значением проводимости. Для установления зависимости значения проводимости от погрешностей изготовления статора и ротора спроектирована физическая модель УМ-1, представляющая увеличенный в несколько раз чувствительный элемент, в котором возможно устанавливать определенные значения отклонений от заданных размеров элементов растрового торцевого сопряжения. С помощью разработанной модели проверялось влияние трех основных видов инструментальных погрешностей:

- погрешность от изменения величины рабочего зазора;
- погрешность от несоосности статора и ротора;
- погрешность от непараллельности сопрягаемых поверхностей.

На рис. 1 приведены конструкция модели и ее общий вид. Модель состоит из неподвижного ферромагнитного статора 5, на торцевой поверхности которого имеются кольцевые проточки и прорезаны радиальные пазы с уложенными в них обмотками возбуждения и считывания 4. Внутри статора по плотной посадке крепится втулка 7, в которую вставляется ось 1 с закрепленным на ней диском 2 и свободно вращающимся ротором 3. Ось от поворота фиксируется винтом 9 и шайбой 10. На конической поверхности диска для задания угла поворота нанесены деления с шагом в пять градусов. Необходимый зазор между рабочими поверхностями статора и ротора выставляется с помощью шайб 11. Для получения заданной величины несоосности статора 5 и ротора 3 втулка 7 выполняется сменной с разными значениями несоосности между центральным отверстием и посадочным диаметром. Для получения различных значений непараллельности торцевых сопрягаемых поверхностей статора и ротора имеется комплект втулок 7, в которых центральное отверстие выполнено под разными углами относительно посадочной поверхности и смещено относительно центра посадочного диаметра. Таким образом, с помощью настоящей модели можно анализировать как влияние отдельных составляющих инструментальной погрешности, так и их комплексное воздействие на амплитуду и форму выходного сигнала. Это осуществляется путем изменения количества установочных шайб 11 при одновременной установке втулок 7.

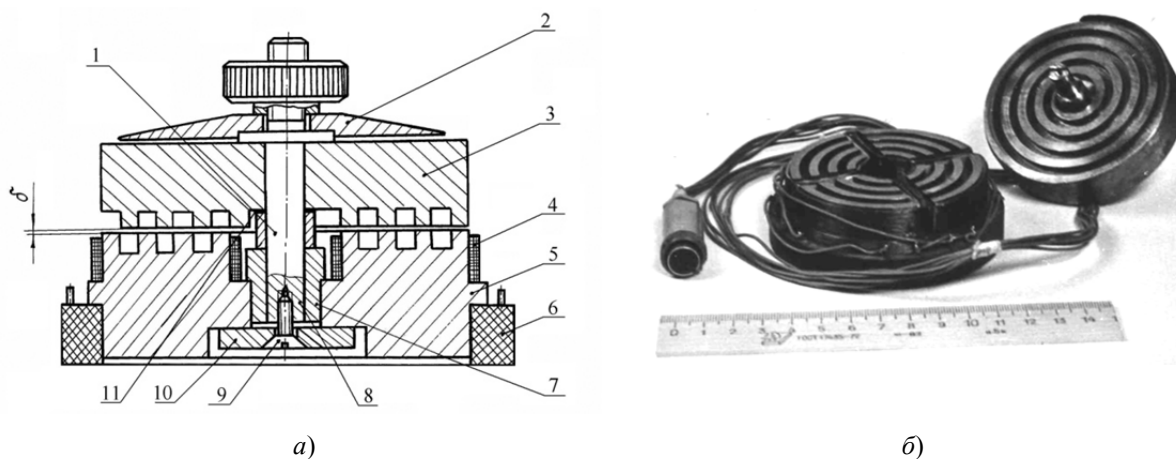


Рис. 1. Конструктивная схема (а) и внешний вид модели УМ-1 (б)

Для исследования цилиндрических растровых электромагнитных сопряжений были изготовлены две установки: У-1 с подвижными растрами и У-2 с подвижными обмотками.

Установка У-1 (рис. 2) содержит П-образный магнитопровод 1 и катушку возбуждения 2, создающую магнитный поток в зазоре, образованном неподвижным зубцовым растром 3, угол установки которого можно изменять в процессе эксперимента. Верхний растр 4 перемещается с помощью микрометрической головки, которая одновременно измеряет перемещение растра. Виды исследуемых растров показаны на рис. 3. Измерительная обмотка наклеивается на нижний растр.

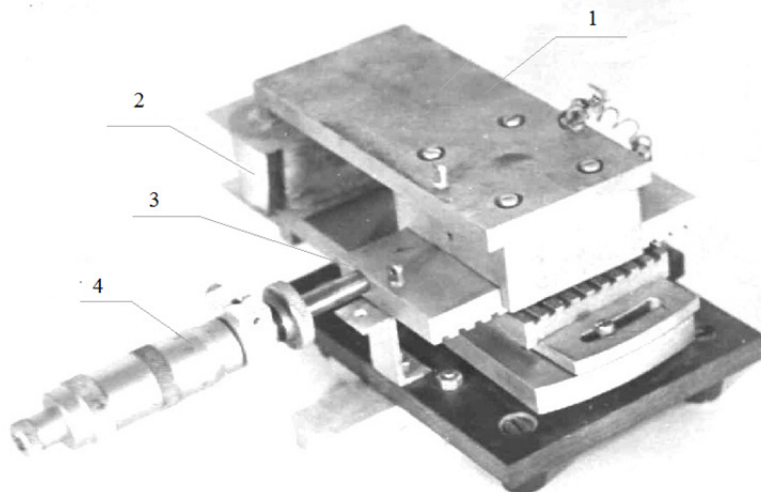


Рис. 2. Установка для исследования комбинационных сопряжений с подвижными растрами

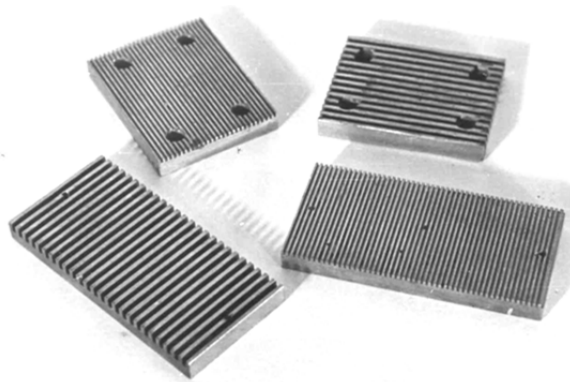


Рис. 3. Исследуемые растры

На рис. 4 изображена установка У-2, состоящая из О-образного магнитопровода 1 и двух катушек 2 и 3, создающих рабочий магнитный поток между двумя полюсными наконечниками 4, расположенными в центре. На полюсные наконечники, которые могут изменять угол наклона, так как они механически соединены с поворотными лимбами 6, укрепляются ферромагнитные зубцовые растры 7. Исследуемые обмотки расположены на текстолитовых пластинах и могут перемещаться с помощью микрометрической головки.

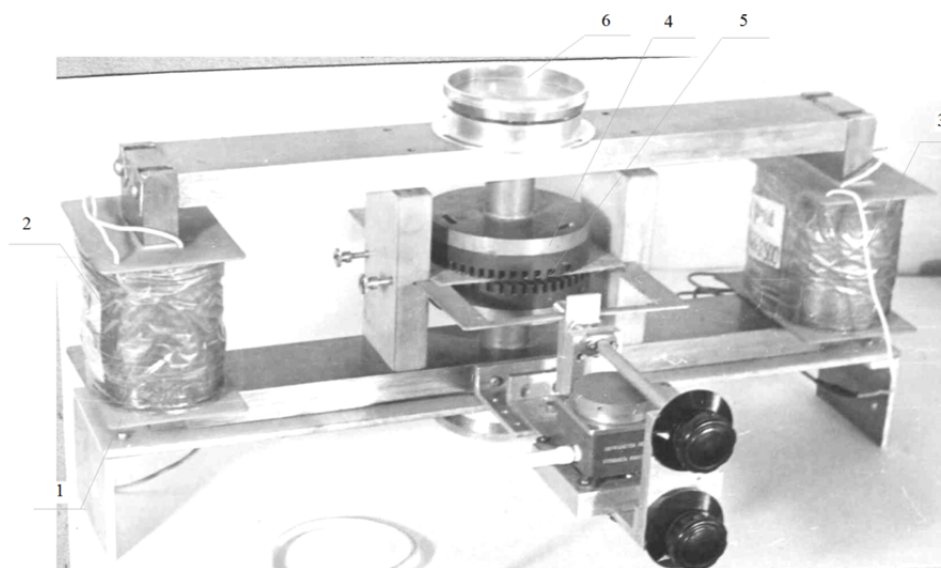


Рис. 4. Установка для исследования комбинационных сопряжений с подвижными обмотками

На рис. 5 изображена комбинационная картина магнитного поля в растровых зазорах установок УМ-1, У-1 и У-2, заполненных магнитной жидкостью, зафиксированная с помощью эпоксидной смолы.

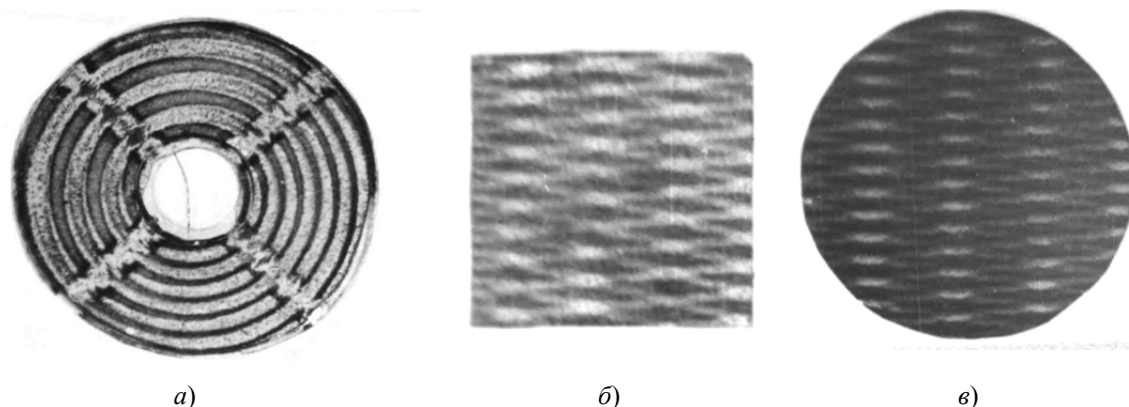


Рис. 5. Картина магнитного поля в комбинационном зазоре установок:  
а – установка УМ-1; б – установка У-1; в – установка У-2

Установки У-1 и У-2 использовались для проверки расчетов магнитной проводимости в растровом сопряжении, с их помощью исследовались вопросы влияния параметров обмотки, геометрии растров, а также на них были проведены работы по поиску оптимальных соотношений при разработке датчиков перемещений ПУИ 065, ПУИ 065-01, ПЛИ 086 [2].

#### Заключение

Проведенные работы по физическому моделированию инструментальных погрешностей растровых трансформаторных датчиков перемещений подтвердили корректность и достоверность полученных расчетных соотношений. Расхождения между расчетными и экспериментальными результатами (10–15 %) объясняются как допущениями, принятыми при расчетах, так и погрешностями определения действительных величин зазоров, несоосностей и перекосов при проведении эксперимента.

#### Список литературы

1. Конюхов, Н. Е. Электромагнитные датчики механических величин / Н. Е. Конюхов, Ф. М. Медников, М. Л. Нечаевский. – М. : Машиностроение, 1987. – 255 с.
2. Трофимов, А. Н. Унифицированный ряд высокотемпературных растровых электромагнитных датчиков перемещений / А. Н. Трофимов, А. В. Блинов, А. А. Трофимов // Датчики и системы. – 2007. – № 7. – С. 24–29.

#### **Дмитриенко Алексей Геннадьевич**

кандидат технических наук,  
генеральный директор,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
E-mail: niifi@sura.ru

#### **Dmitrienko Aleksey Gennad'evich**

candidate of technical sciences,  
director general,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements

#### **Трофимов Алексей Анатольевич**

доктор технических наук, доцент  
кафедры информационно-измерительной техники,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: alex.t1978@mail.ru

#### **Trofimov Aleksey Anatol'evich**

doctor of technical sciences, associate professor  
of sub-department of information  
and measuring equipment,  
Penza State University

**Нефедьев Дмитрий Иванович**

доктор технических наук,  
заведующий кафедрой  
информационно-измерительной техники,  
Пензенский государственный университет  
E-mail: iit@pnzgu.ru

***Nefed'ev Dmitriy Ivanovich***

doctor of technical sciences,  
head of sub-department  
of information and measuring equipment,  
Penza State University

---

УДК 681.2.088

***Дмитриенко, А. Г.***

**Моделирование инструментальных погрешностей растровых датчиков перемещений /**

А. Г. Дмитриенко, А. А. Трофимов, Д. И. Нефедьев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 3 (5). – С. 3–8.