

Разработанные на кафедре средства измерений демонстрировались на различных выставках, в том числе на ВДНХ (ВВЦ). Практически все научные разработки проводятся на уровне изобретений. Преподавателями и сотрудниками кафедры получено около 700 авторских свидетельств СССР и патентов РФ на изобретения, более 20 зарубежных патентов.

Опыт научно-исследовательских работ на кафедре и в отраслевой лаборатории, знание измерительных задач, возникающих во многих организациях, и широкое привлечение студентов к реальному проектированию позволили решить многие важные задачи в деле подготовки преподавателей, научных и инженерных работников высшей квалификации для научно-исследовательских институтов и промышленных

предприятий. В результате проделанной работы за время существования кафедры выпущено более 3000 инженеров, подготовлено более 200 кандидатов и докторов технических наук.

В настоящее время в числе преподавателей кафедры 8 докторов наук (профессоров) и 5 кандидатов наук (доцентов). Именно высокая научная и педагогическая квалификация преподавателей кафедры «Информационно-измерительная техника» является залогом успеха в подготовке высококвалифицированных специалистов для различных отраслей промышленности.

В этом номере журнала публикуются статьи сотрудников кафедры по основным проблемам и направлениям ее работы.

531.714.2.084.2

Разработка унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерений и контроля специальной техники

А. Г. ДМИТРИЕНКО*, А. Н. ТРОФИМОВ*, А. А. ТРОФИМОВ**

* Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия, e-mail: niifi@sura.ru

** Пензенский государственный университет, Пенза, Россия, e-mail: Alex.t@mail.ru

Сформулированы цели и определены объекты унификации, рассмотрены основные ее направления при разработке и модернизации датчиков. Приведены базовые конструкции чувствительных элементов и датчиков перемещений, разработанные на основе этих элементов.

Ключевые слова: чувствительный элемент, датчик перемещений, унификация, растровое сопряжение, унифицированный ряд.

The goals are formulated and the unification objects are defined, basic unification directions are considered at working out and modernisation of transducers. The basic sensitive elements designs and the design of displacement transducers based on these elements are given.

Key words: sensitive element, displacement transducer, unification, raster interface, unified series.

Эффективность развития и эксплуатации систем измерений, контроля, управления и автоматической защиты при проектировании изделий специальной техники определяется технико-экономическими характеристиками первичных измерительных преобразователей (датчиков), к которым предъявляется целый комплекс требований, как правило, противоречивого характера.

Например, обеспечение высокой точности при воздействии жестких дестабилизирующих факторов; малое энергопотребление и высокий уровень выходного сигнала; обеспечение высокой надежности, качества и серийнопригодности, требующих длительной отработки изделия с соблюдением всех этапов проектирования в соответствии с государственными стандартами при минимальных сроках разработки и серийного освоения. Таким образом, перед разработчиком датчиковой аппаратуры стоит сложнейшая задача — в минимальные сроки создать перспективные качественные и надежные датчики с существенно лучшими метрологическими и эксплуатационными характеристиками, чем

существующие приборы-аналоги. Одним из путей решения этой задачи является конструирование новых типов датчиков на основе унифицированных элементов [1]. Так как качество прибора, в конечном счете, определяется количеством умственного труда, затраченного на этапе разработки, применение унифицированных, а значит, хорошо отработанных элементов, позволяет сократить сроки разработки без ущерба для качества изделия.

Казалось бы, такой подход к созданию высококачественных конструкций очевиден, однако на практике его реализация весьма затруднительна по следующим причинам:

унифицированные элементы создаются обычно путем отработки хорошо зарекомендовавших себя при изготовлении и эксплуатации узлов ранее разработанных конструкций, т. е. это элементы «вчерашнего» дня;

при проектировании перспективных изделий к ним предъявляются такие требования, которым ранее разработанные унифицированные элементы в большинстве случаев не отвечают;

стремительное развитие и постоянное обновление элементной базы также не позволяют применять при новых разработках ранее отработанные конструктивные решения.

Для устранения этих противоречий необходима опережающая разработка унифицированных элементов датчиков, по своим техническим характеристикам отвечающих требованиям к перспективным изделиям специальной техники. Это очень сложная задача, требующая для своего решения точного прогнозирования направления развития не только датчиковой аппаратуры, но и тех требований разработчиков систем измерений и контроля, которые будут предъявлены к датчикам при проектировании новых изделий.

Формирование исходных данных для разработки перспективных унифицированных чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков перемещений. Прогнозирование технических требований к перспективным датчикам проводилось по двум направлениям:

опрос предприятий-заказчиков датчиковой аппаратуры по определению метрологических, эксплуатационных и массогабаритных характеристик датчиков для вновь разрабатываемых изделий;

анализ тенденций развития датчиков специального назначения для сложных технических объектов (СТО) и авиации по материалам российских и зарубежных источников.

В результате анализа тенденций развития датчиковой аппаратуры можно сделать вывод, что как в России, так и в ведущих странах зарубежья развитие датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА), проектируемой для систем специальной техники, в конечном счете сводится к совершенствованию технико-экономических характеристик по следующим направлениям:

повышение точности измерений за счет применения наиболее эффективных принципов преобразования, вновь разрабатываемых комплектующих и материалов, микропроцессорной обработки информационных сигналов;

расширение диапазонов измерений в сторону малых и больших значений измеряемых величин;

повышение термоустойчивости датчиков в расширенном диапазоне температур, в том числе при нестационарных воздействиях, благодаря использованию термостойких материалов и электронных компонентов, специальных принципов преобразования;

снижение массы и габаритных размеров датчиков благодаря внедрению микромеханических ЧЭ с использованием технологий микроэлектроники;

повышение виброустойчивости преимущественно путем уменьшения габаритных размеров и массы, применения компенсационных элементов, технологий микромеханики (микроминиатюризации);

увеличение дистанционности измерений и повышение быстродействия;

повышение помехоустойчивости благодаря использованию корреляционного метода измерения, генераторных измерительных цепей, передачи информационных сигналов по волоконно-оптическим линиям связи, использованию избыточных кодов, аналоговой и цифровой фильтрации;

увеличение ресурса работы датчиков путем подбора особо стабильных и прочных материалов, обеспечения достаточного запаса по рабочим режимам;

повышение надежности благодаря резервированию и применению элементов с пониженной и равной интенсивностью отказов;

снижение энергопотребления;

обеспечение широкой унификации и стандартизации датчиков по посадочным размерам, выходным сигналам, схемам внешних соединений, что позволит в последующем с малыми затратами перейти на новые датчики;

упрощение и снижение затрат на обслуживание, эксплуатацию.

Результаты опроса специалистов ведущих предприятий соответствующих отраслей подтвердили общую тенденцию развития датчиков-преобразующей аппаратуры.

На примере датчиков линейных и угловых перемещений сформулируем основные требования к датчикам для перспективных изделий на период до 2020 г. (см. таблицу).

Кроме перечисленных в таблице, к датчикам предъявляются требования по унификации и серийнопригодности, минимальному энергопотреблению, минимальным массам и габаритным размерам, пожаро- и взрывобезопасности и ряд других.

Унифицированные ЧЭ датчиков угловых и линейных перемещений. Важное место в общей номенклатуре первичных преобразователей перемещений занимают электромагнитные, а именно взаимоиנדуктивные (трансформаторные) преобразователи перемещений. Они отличаются высокой надежностью в жестких условиях эксплуатации, относительно малой массой, широким диапазоном измеряемых перемещений, линейностью функции преобразования, отсутствием гальванической связи между цепями питания и

Основные требования к датчикам для перспективных изделий отрасли на период до 2020 г.

Контролируемый параметр	Метрологические характеристики				Ресурс, ч	Вероятность безотказной работы, не менее	Условия эксплуатации				
	диапазон измерений	выходной сигнал	основная погрешность, %	погрешность от температуры, % / °С, не более			температура, °С	вибрация	удары	акустические шумы, дБ	влажность, %
Угловые перемещения, °	0—90 0—180 0—360	Аналоговый, цифровой	0,05	0,0005	150000	0,995	—60 до +200	До 50 <i>gf</i> 5—5000 Гц	До 1000 <i>g</i>	До 180	До 98
Линейные перемещения, мм	0—0,5 0—1,0 0—5,0 0—10,0 0—20,0 ... 0—1000,0	Аналоговый, цифровой	0,01	0,001	150000	0,995	—60 до +200	До 50 <i>gf</i> 5—5000 Гц	До 1000 <i>g</i>	До 180	До 98

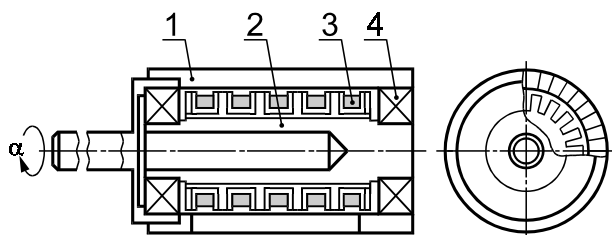


Рис. 1. Конструктивная схема датчика угловых перемещений:
1 — ротор; 2 — статор; 3 — обмотки; 4 — подшипник

измерительными цепями, достаточно высокой точностью измерений, простотой в изготовлении и эксплуатации.

В настоящее время в СТО и особенно в авиационной технике для измерения перемещений широко используют трансформаторные датчики различных конструктивных исполнений, что снижает возможность их серийного производства, повышает цену, требует различных вторичных преобразователей. Используемые датчики имеют ряд недостатков, например, сельсины сложны в изготовлении, не удовлетворяют возросшим требованиям по точности и массогабаритным показателям, потенциометрические датчики из-за наличия скользящего электрического контакта имеют ограниченный ресурс и низкую виброустойчивость, массогабаритные показатели бесконтактных трансформаторных и токовых датчиков линейных перемещений зависят от диапазона измерений. Кроме того, все перечисленные выше датчики имеют ограниченный диапазон рабочих температур и достаточно высокую температурную погрешность (0,01 % на 1 °C). В результате возникла необходимость разработки унифицированного ЧЭ, на основе которого можно построить новый класс датчиков, имеющих малую температурную погрешность, высокую точность измерений, малые габаритные размеры, не зависящие от диапазона измерения.

Существенного улучшения технических характеристик трансформаторных датчиков угловых перемещений удалось достичь при использовании растровых сопряжений цилиндрических поверхностей статора и ротора [2—4]. На рис. 1 изображена конструктивная схема ЧЭ датчика угловых перемещений, состоящего из статора 2, ротора 1, обмоток возбуждения и считывания 3, расположенных в кольцевых проточках статора, соединенных последовательно-встречно. Ротор

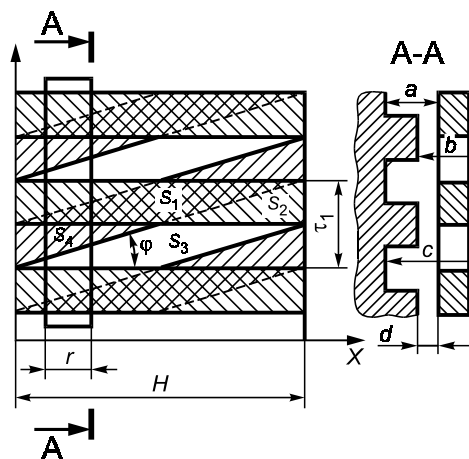


Рис. 2. Проекции зубцовых зон ротора и статора

установлен на подшипниках 4. Статор и ротор изготовлены из пермаллоя марки 79 НМ.

Зубья статора выполнены под углом φ к зубьям ротора, причем в отличие от сельсинов и редуктосинов статор ЧЭ расположен внутри ротора. На рис. 2 показан элемент проекции зубцовых зон статора и ротора, образующих растровое сопряжение и контур одной из четырех обмоток считывания шириной g .

В растровом датчике перемещений с комбинационным сопряжением зубцовых растров размеры ЧЭ (обмоток) значительно больше размеров отдельных элементов зубцов. Это позволяет принять допущение об однородности магнитного поля в воздушном зазоре датчика и возможности применения экспериментально-аналитического метода расчета магнитной проводимости в воздушном зазоре в [4].

Для пояснения метода воспользуемся рис. 2, на котором показаны проекции зубцовых зон ротора и статора и контур обмотки. Заштрихованными линиями отмечены зоны зубцовых поверхностей. Для учета влияния боковых магнитных потоков вводится экспериментальный коэффициент ξ_i , который уравнивает интегральные значения потоков в реальном пазу и для расчетного случая, когда поле такого же паза предполагается однородным.

Из рис. 2 следует, что участки сопряжения можно разделить на четыре типа, отличающихся проводимостью. Суммарную магнитную проводимость контура обмотки G выразим следующим образом:

$$G = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^m \Delta G_j = \sum_{i=1}^m \Delta G_1 + \sum_{i=1}^m \Delta G_2 + \sum_{i=1}^m \Delta G_3 + \sum_{i=1}^m \Delta G_4, \quad (1)$$

где m — число участков цепи «зуб — впадина»; $\Delta G_1, \Delta G_2, \Delta G_3, \Delta G_4$ — магнитная проводимость участков «выступ над выступом», «выступ ротора над впадиной статора», «впадина над впадиной», «выступ статора над впадиной ротора», соответственно; i — общее число участков.

С учетом геометрических параметров сопряжения, показанных на рис. 2, получим выражение для расчета магнитной проводимости воздушного зазора

$$G = (\mu_0 H / \tau_1) [\xi_1 S_1 / d + \xi_2 S_2 / a + \xi_3 S_3 / c + \xi_4 S_4 / b], \quad (2)$$

где H — высота контура считывания (см. рис. 2); $\tau_1 = \text{tg} H$ — шаг нарезки зубцового сопряжения; φ — угол наклона зубцов статора; S_1 — S_4 — площадь участков, охваченных обмоткой считывания, с проводимостями G_1 — G_4 , соответственно; a, b, c, d — глубина воздушных зазоров участков.

Так как воздушный зазор участка «выступ статора над впадиной ротора» равен воздушному зазору участка «впадина над впадиной» ($b = c = \infty$), а площади участков S_2 и S_4 одинаковы, формула (2) примет вид

$$G = (\mu_0 H / \tau) [\xi_1 S_1 / d + (\xi_2 / a + \xi_4 / b) S_2 + \xi_3 S_3 / a].$$

Для расчета площадей S_1 , S_2 , S_3 из геометрических со-
 образий выразим значение относительной ширины кон-
 тура

$$\eta = r \operatorname{tg} \varphi / \tau_1,$$

где r — ширина контура обмотки.

Площадь участка «выступ статора над впадиной ротора»

$$S_2 = \eta \tau_1^2 / \gamma_1 \operatorname{tg} \varphi - S_1,$$

где $\gamma_1 = \tau_1 / \varepsilon_1$.

Площадь участка «впадина над впадиной»

$$S_3 = \left(\eta \tau_1^2 / \gamma_1 \operatorname{tg} \varphi \right) (\gamma_1 - 2) + S_1;$$

$S_1 = S_3$ — площадь участка «выступ над выступом».

Для одного такого участка площадь S_1 как функцию перемещения x вычислим следующим образом:

$$S_1(x) = \begin{cases} \operatorname{tg} \varphi [rH(1/2 - r/4H) - x^2] & \text{при } -r/2 \leq x \leq r/2; \\ r \operatorname{tg} \varphi (H/2 - x) & \text{при } r/2 \leq x \leq (H/2 - r/2); \\ \operatorname{tg} \varphi [r^2/4 + (x - H/2)^2] & \text{при } (H/2 - r/2) \leq x \leq (H/2 + r/2); \\ r \operatorname{tg} \varphi (x - H/2) & \text{при } (H/2 + r/2) \leq x \leq (H - r/2). \end{cases}$$

Так как в датчике имеется четыре обмотки считывания, то функции $G_i(x)$ будут сдвинуты друг относительно друга на значение, равное $H/4$:

$$G_i(x) = G_1(x + iH/4; r),$$

где $i = 1, \dots, 4$.

Тогда функции магнитной проводимости воздушного зазора будут иметь вид

$$G_1(x, r) = G(x + r/2; r);$$

$$G_2(x, r) = G(x + r/2 + H/4; r);$$

$$G_3(x, r) = G(x + r/2 + H/2; r);$$

$$G_4(x, r) = G(x + r/2 + 3H/4; r).$$

Подставив значения участков магнитной проводимости $G_1 - G_4$ в (1), получим общую магнитную проводимость воздушного зазора.

Датчики угловых перемещений. Элементы малогабаритного датчика угловых перемещений ПУИ 065, построенного на базе ЧЭ (см. рис. 1), приведены в [5].

Датчик состоит из корпуса, внутри которого размещены узлы статора и ротора. Обмотки возбуждения и считывания расположены в кольцевых проточках статора, при этом четыре секции обмоток возбуждения и считывания соединены последовательно-встречно. Выводы обмоток припаяны к штырям контактной колодки. Статор закреплен в отверстии корпуса, ротор установлен на подшипниках [6].

При повороте ротора происходит изменение сопротивления магнитному потоку, создаваемому секциями обмоток возбуждения, приводящее к соответствующему изменению выходной ЭДС с каждой секции обмотки считывания.

Для контроля угловых перемещений с повышенной степенью точности был разработан трансформаторный преобразователь угловых перемещений ПУИ 065-01. Датчик состоит из преобразователя ПУИ 065 и повышающего редуктора с передаточным отношением $i_n = 15$. Для исключения погрешности гистерезиса в редукторе использовано безлюфтовое зацепление, что позволило при невысокой точности

изготовления зубчатых колес (7-я степень) получить высокоточный датчик угловых перемещений.

Унифицированный ряд датчиков линейных перемещений. На базе унифицированного ЧЭ кроме датчиков угловых перемещений разработан унифицированный ряд датчиков линейных перемещений ПЛИ 086, охватывающий 10 диапазонов измерений от 0—30 до 0—1000 мм. Основные элементы датчиков ПЛИ 086 приведены в [5].

Они состоят из корпуса, расположенных внутри него статора и ротора. В кольцевых проточках статора размещены питающая и измерительная обмотки. Выводы обмоток и кабеля припаяны к штырям контактной колодки. Узел ротора установлен в подшипниках качения и содержит закрепленный с помощью пружинного кольца шарик, который входит в профилированную винтовую канавку штока.

Поступательное движение штока при помощи винтовой канавки и шарика преобразуется во вращение ротора, происходит изменение выходного сигнала датчика от угла поворота, которое обрабатывается блоком электроники. Отличительной особенностью всех разработанных растровых датчиков угловых и линейных перемещений, благодаря применению унифицированного ЧЭ, является возможность использования одного блока электроники на все датчики.

Таким образом, анализ работ по опережающему созданию унифицированного ЧЭ, отвечающего перспективным требованиям отрасли, показал правильность выбранного подхода к решению задачи разработки в короткие сроки комплекса датчиков линейных и угловых перемещений, отличающихся высокой степенью унификации, надежности и взаимозаменяемости при работе с одним типом вторичного преобразователя. Кроме того, благодаря разработке унифицированного трансформаторного ЧЭ, по своим габаритным и посадочным размерам соответствующего потенциометру СП5-21, применяемому в серийных датчиках перемещений, возможна модификация этих датчиков без существенных доработок конструкции с сохранением габаритных и присоединительных размеров.

Л и т е р а т у р а

1. Трофимов А. А. Основные задачи унификации и стандартизации при разработке датчиков перемещений специального назначения // Измерительная техника. 2008. № 12. С. 56.
2. Конюхов Н. Е., Медников Ф. М., Нечаевский М. Л. Электромагнитные датчики механических величин. М.: Машиностроение, 1987.
3. Трофимов А. Н., Быченков В. И. Растровые трансформаторные датчики перемещений // Приборы и системы управления. 1990. № 10. С. 15—17.
4. Трофимов А. А., Трофимов А. Н. Взаимоиндуктивные датчики перемещений / Монография. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2009.
5. Трофимов А. А., Трофимов А. Н. Расширение температурного диапазона растровых трансформаторных датчиков перемещений // Измерительная техника. 2009. № 6. С. 24—26.
6. Трофимов А. Н., Блинов А. В., Трофимов А. А. Унифицированный ряд высокотемпературных растровых электромагнитных датчиков перемещений // Датчики и системы. 2007. № 7. С. 24.

Дата принятия 28.07.2010 г.