

Л и т е р а т у р а

1. **Жданов Г. С.** О скорости углеводородного загрязнения объектов в микрозондовых системах // Поверхность. 1983. № 1. С. 65—72.
2. **Postek M. T.** An approach to the reduction of hydrocarbon contamination in the scanning electron microscope // Scanning. 1996. V. 18. N 4. P. 269—274.
3. **Tortonese M., Guan Y., Prochazka J.** NIST-traceable calibration of CD-SEM magnification using a 100 nm pitch standard // Proc. SPIE. 2003. V. 5038. P. 711—718.

4. **Гавриленко В. П. и др.** Влияние контаминации в РЭМ на профиль рельефных элементов нанометрового диапазона // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 2. С. 2—6.
5. **Novikov Yu. A. e. a.** Method for linear measurements in the nanometre range // Meas. Sci. Technol. 2008. V. 18. N 2. P. 367—374.
6. **Reimer L.** Transmission electron microscopy: Physics of image formation and microanalysis. N.Y.: Springer, 1997. P. 492.
7. **Silvis-Cividjan N., Hagen C.W., Kruit P.** Spatial resolution limits in electron-beam-induced deposition // J. Appl. Phys. 2005. V. 98. P. 084905-1—084905-12.

Дата принятия 13.11.2012 г.

## ЛИНЕЙНЫЕ И УГЛОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.586.787

### Новое поколение высокоточных цифровых преобразователей угла

**В. Д. АКСЕНЕНКО, О. К. ЕПИФАНОВ**

ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург, Россия,  
e-mail: amolochnikov@eprib.ru

*Представлены результаты работ по повышению точности, технологичности и информационной надежности цифровых преобразователей угла. Приведены их структуры, особенности синусно-косинусных датчиков угла и принципы обработки информации при самокалибровке. Описаны конструкция и основные характеристики датчиков угла.*

**Ключевые слова:** синусно-косинусный вращающийся трансформатор, многополюсный вращающийся трансформатор, цифровой преобразователь угла, самокалибровка.

*The results of works on improvement of accuracy, manufacturability and informational reliability of digital angle converters are presented. Their structures and features of the sine-cosine angle sensors and the principles of data processing at self-calibration are given. Design and main specifications of angle sensors are described.*

**Key words:** sine-cosine rotating transformer, multipolar rotating transformer, digital angle converter, self-calibration.

В системах, работающих в жестких эксплуатационных условиях, угол преобразуется в код, как правило, следящими преобразователями на основе синусно-косинусных датчиков угла (ДУ). Такие преобразователи относятся к преобразователям абсолютного типа: сигналы синусно-косинусных ДУ содержат полную информацию об угловом положении вала, которая в цифровом виде отображается на выходе преобразователя. Несмотря на более чем 50-летнюю историю развития преобразователей этого типа, повышение их точности и технологичности до сих пор остается актуальной задачей и регулярно освещается в отечественной и зарубежной печати [1—4].

Преобразователи данного типа работают на основе отношения сигналов и позволяют использовать ДУ и электронную часть преобразователя на значительных расстояниях. Это их достоинство, поскольку устойчивость ДУ к внешним воздействиям значительно выше, чем электрон-

ной части, особенно если применяются ДУ электромашинного типа (синусно-косинусные трансформаторы, редукто-сины и т. п.) [5].

Индукционные ДУ типа синусно-косинусных вращающихся трансформаторов (СКВТ) представляют собой электрические машины с одной или двумя обмотками возбуждения на роторе и двумя обмотками (синусной и косинусной) на статоре. По принципу действия это трансформаторы, у которых взаимоиндукция между обмоткой возбуждения и выходными обмотками зависит от их пространственного расположения и изменяется согласно функции соответственно синуса и косинуса угла поворота ротора относительно статора. Закон изменения взаимоиндукции определяется распределением обмоток, уложенных в пазах ротора и статора. У двухполюсных СКВТ в пространстве формируется одна пара полюсов и выходные напряжения изменяются пропорционально синусу и косинусу угла поворота, а у многополюсных

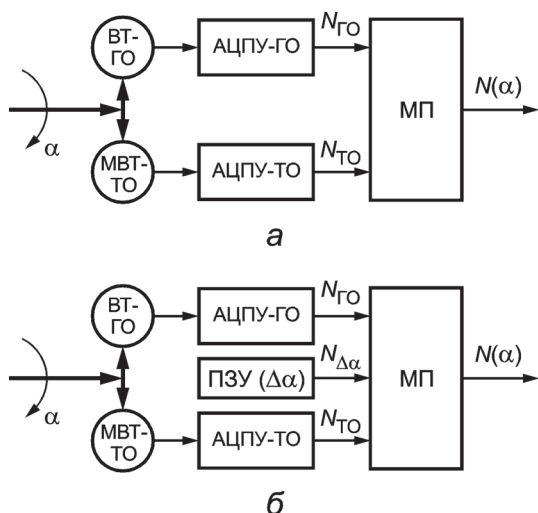


Рис. 1. Двухотсчетный преобразователь угла в код (а) и с коррекцией кода угла (б):

ВТ-ГО, МВТ-ТО — двух- и многополюсный вращающиеся трансформаторы каналов грубого и точного отсчетов, соответственно; АЦПУ-ГО, АЦПУ-ТО — аналого-цифровые преобразователи каналов грубого и точного отсчетов; ПЗУ — постоянное запоминающее устройство; МП — микропроцессор;  $N_{ГО}$ ,  $N_{ТО}$  — коды угла грубого и точного отсчетов

вращающихся трансформаторов (МВТ) —  $p$  пар полюсов и выходные напряжения изменяются  $p$  раз пропорционально синусу и косинусу угла при повороте ротора на один оборот ( $p$  — коэффициент электрической редукции (КЭР), как правило,  $p = 2^n$ ).

Для повышения точности цифровые преобразователи угла (ЦПУ) строят по двухотсчетной схеме (рис. 1). Они состоят из двух- и многополюсного вращающихся трансформаторов ВТ-ГО, МВТ-ТО каналов грубого (ГО) и точного (ТО) отсчетов, соответственно, и аналого-цифровых преобразователей АЦПУ-ГО, АЦПУ-ТО их сигналов в коды грубого  $N_{ГО}$  и точного  $N_{ТО}$  отсчетов. Из  $N_{ГО}$ ,  $N_{ТО}$  в микропроцессоре МП формируется выходной код угла разрядностью  $m + n$ , в котором младшие  $m$  разрядов определяются кодом  $N_{ТО}$ , а старшие  $n$  — кодом  $N_{ГО}$ , причем младший из  $n$  уточняется по значению перекрывающихся разрядов  $N_{ГО}$  и  $N_{ТО}$ .

Погрешность ЦПУ определяется суммарной погрешностью МВТ и электронного преобразователя. К погрешности МВТ, которую при современном уровне технологии не удается обеспечить ниже 5 — 10", добавляется 1 — 3" погрешности преобразования его сигналов в код.

Распространенный способ повышения точности ЦПУ — их калибровка. При калибровке ДУ устанавливают на измерительный стенд и сравнительным методом определяют погрешность в нескольких равномерно изменяемых угловых положениях [6]. Полученные значения  $\Delta\alpha$  записываются в виде таблицы, например, в постоянное запоминающее устройство ПЗУ (см. рис. 1, б). Систематическая погрешность, найденная при калибровке и зафиксированная в виде полинома, градуировочной кривой или таблицы поправок, в дальнейшем используется для коррекции выходной информации. Для коррекции выходного кода  $N(\alpha)$  преобразователя в угловых положениях, отличающихся от тестированных, используют метод ступенчатой или линейной интерполяции.

Богатый спектральный состав и присутствие в погрешности гармоник высокого порядка требуют проведения измерений в большом числе угловых положений (до нескольких тысяч на обороте). Калибровка должна проводиться с высокой точностью на уникальном оборудовании, что повышает трудоемкость и стоимость этой операции. При указанных недостатках такой подход не обеспечивает эффективной компенсации погрешности по ряду причин.

Условия эксплуатации ЦПУ существенно отличаются от стендовых: ДУ устанавливают на другое посадочное место и подключают к электронике другими кабелями. На работу ЦПУ оказывают влияние элементы конструкции и соседние устройства, в результате его погрешность отличается от определенной при калибровке. Калибровка ЦПУ по традиционной методике в условиях эксплуатации невозможна, как правило, из-за конструктивных ограничений объекта и отсутствия подходящих эталонов угла, обеспечивающих тысячи угловых положений с необходимой точностью.

Погрешность ЦПУ изменяется в зависимости от условий эксплуатации в результате микроперемещений и деформации конструктивных элементов ДУ, изменения утечек и паразитных связей в трактах передачи сигналов. Изменение параметров погрешности происходит также с течением времени при износе трущихся частей конструкции и старении материалов, использованных в электронике и линиях связи. Таким образом, зависимость погрешности ЦПУ от места, условий и времени эксплуатации делает невозможным обеспечение точности преобразования путем его однократной калибровки в стендовых условиях.

Двух- и многополюсный СКВТ существенно различаются конструкцией и технологией производства. Первые, как правило, выполняют с распределенными обмотками на шихтованном магнитопроводе, в то время как МВТ целесообразно изготавливать, особенно в условиях мелкосерийного и единичного производства, на сплошных магнитопроводах с сосредоточенными обмотками. Конструктивная неоднородность создает определенные трудности для их совмещения в единой конструкции двухотсчетного ДУ, преимущественно для встраиваемых бескорпусных исполнений (без собственных подшипников) с большим диаметром вала.

Перечисленные недостатки в значительной мере преодолены в новом поколении ЦПУ, разработанных в ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Был применен мехатронный подход, заключающийся в системной интеграции электромеханической и электронных частей, создании структуры с информационной избыточностью и ее использовании при обработке информации средствами вычислительной техники. Новая структура ЦПУ и алгоритмы обработки сигналов ДУ кроме повышения точности и технологичности обеспечили новые функциональные возможности. Схема одного из указанных ЦПУ приведена на рис. 2, а.

Преобразователи нового поколения также строят по двухотсчетной схеме, и они содержат два идентичных канала, включающих МВТ и электронный преобразователь сигналов ДУ в код угла. Коэффициенты электрической редукции МВТ в каналах выбирают отличающимися на единицу, т. е.  $p_1 = 2^n$ ,  $p_2 = 2^n - 1$ , что позволяет по разности кодов первого  $N_{ГО1}$  и второго  $N_{ГО2}$  каналов сформировать код грубого отсчета  $N_{ГО} = N_{ГО1} - N_{ГО2}$ . Такой подход к формированию грубого отсчета известен и, в основном, применялся ранее в системах на основе ДУ типа Inductosin [7]. Далее на основе пар кодов  $N_{ГО}$ ,  $N_{ТО1}$  и  $N_{ГО}$ ,  $N_{ТО2}$  в цифровом сигнальном процес-

соре (ЦСП) формируются два выходных кода угла разрядностью  $m+n$ , в каждом из которых старшие  $n$  разрядов определяются кодом  $N_{ГО}$ , а младшие  $m$  разрядов — кодом соответствующего канала  $N_{ТО1}$  и  $N_{ТО2}$ .

В новой структуре при тех же аппаратных затратах формируется не одна, а две независимые оценки угла, совместная обработка которых в ЦСП позволяет реализовать самокалибровку и самоконтроль преобразователя. Необходимым условием метода самокалибровки, используемого в рассматриваемом ЦПУ, является различие зависимостей погрешности от угла в первом и втором каналах.

В общем случае коды оценки угла на выходе первого и второго каналов соответственно имеют вид

$$N_1(\alpha) = k\alpha + \Delta N_1(\alpha); \quad N_2(\alpha) = k\alpha + \Delta N_2(\alpha),$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $\alpha$  — угловое положение вала;  $\Delta N_1(\alpha)$ ,  $\Delta N_2(\alpha)$  — погрешности преобразования первого и второго каналов.

Используя информационную избыточность, можно сравнить полученные оценки и получить для любого  $i$ -го углового положения разность погрешностей каналов  $\Delta N_i(\alpha_i) = \Delta N_{1i}(\alpha_i) - \Delta N_{2i}(\alpha_i)$ .

Если каналы имеют разные погрешности, то из полученных  $\Delta N_i(\alpha_i)$  можно выделить погрешности  $\Delta N_1^*(\alpha)$ ,  $\Delta N_2^*(\alpha)$  преобразования первого и второго каналов и уточнить коды  $N_1$ ,  $N_2$  оценки угла методом исключения из них соответствующих оценок погрешности

$$N_1^*(\alpha) = k\alpha + \Delta N_1(\alpha) - \Delta N_1^*(\alpha); \quad N_2^*(\alpha) = k\alpha + \Delta N_2(\alpha) - \Delta N_2^*(\alpha).$$

Самоконтроль ЦПУ обеспечивает не только контроль правильности функционирования, но и контроль сохранения точности преобразования с заданным допуском  $\varepsilon$ . Самоконтроль проводится путем вычисления разности кодов каналов после коррекции их погрешности  $\Delta N^* = (\Delta N_1 - \Delta N_1^*) - (\Delta N_2 - \Delta N_2^*)$  и ее сравнения с  $\varepsilon$ . Если полученная разность не укладывается в допуск, т. е.  $|\Delta N^*| > \varepsilon$  при каких-либо угловых положениях в пределах полного оборота, то это означает, что погрешность каналов изменилась и код угла не может быть скорректирован по данным, полученным в результате проведенной калибровки. В таком случае сигнал  $S(N_1 - N_2)$  информирует о необходимости повторения процесса калибровки, т. е. определения новых значений  $\Delta N_1^*$ ,  $\Delta N_2^*$ .

Для разделения погрешностей ЦПУ между каналами используют спектральный метод. Теоретические основы данного подхода изложены в [8, 9]. Погрешность ЦПУ на основе MBT с известным приближением можно описать суммой составляющих, изменяющихся в зависимости от угла по синусоидальному закону с различной кратностью аргумента. Гармонический состав погрешности определяется конструкцией ДУ и электронных преобразователей и физическими процессами, происходящими в них при преобразовании угла в код. Погрешности различных экземпляров ЦПУ одной конструкции имеют одинаковый набор гармонических составляющих, от образца к образцу изменяются только амплитуды и фазы гармоник.

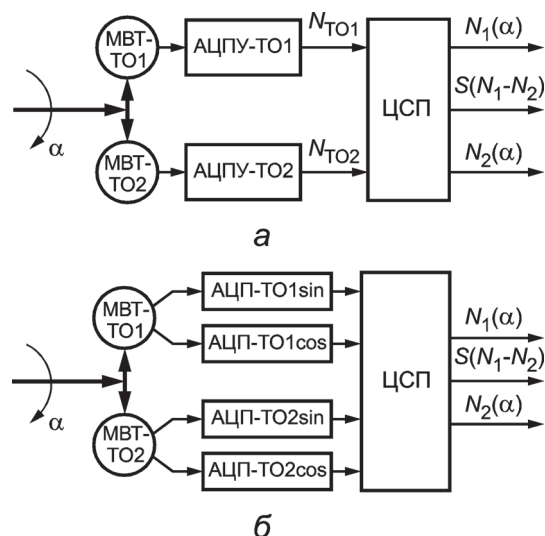


Рис. 2. Двухканальный цифровой преобразователь угла с самокалибровкой и контролем достоверности кода (а) и он же на основе АЦП общего назначения (б):

MBT-TO1, MBT-TO2 — многополюсные вращающиеся трансформаторы каналов точных отсчетов; АЦПУ-ТО1, АЦПУ-ТО2 — аналого-цифровые преобразователи каналов точных отсчетов; ЦСП — цифровой сигнальный процессор

Погрешность преобразователя можно представить как

$$\Delta\alpha = \sum_j v_j \sin(j\alpha + \psi_j) + \sum_i v_i \sin(ip\alpha + \phi_i), \quad (1)$$

где  $\alpha$  — угол поворота ротора ДУ;  $p$  — коэффициент редукции ДУ;  $i, j$  — целые числа  $v_j$ ,  $v_i$  и  $\psi_j$ ,  $\phi_i$  — амплитуды и фазы гармоник.

Первая сумма в (1), называемая длиннопериодной погрешностью, определяется неидеальностью изготовления и установки поверхностей статора и ротора ДУ, образующих воздушный зазор. Значительные амплитуды имеют гармоники погрешности с  $j = 1; 2$ .

Вторая сумма — внутрипериодная погрешность — доминирует по величине и содержит гармонические составляющие, зависящие от угла  $\alpha$  в функции  $ip\alpha$ . Существенные амплитуды гармоник обусловлены: паразитными связями между трактом возбуждения и трактами прохождения выходных сигналов в ДУ, электронном преобразователе и в линиях связей между ними при  $i = 1$ ; асимметрией синусного и косинусного трактов ДУ и электронного преобразователя при  $i = 2$ ; несинусоидальностью зависимости амплитуды выходных сигналов ДУ от угла поворота при  $i = 4; 8; 12; 16$  [10].

В каналах с различными коэффициентами редукции  $p_1$ ,  $p_2$ , имеющими погрешность

$$\Delta\alpha_1 = \sum_j v_j \sin(j\alpha + \psi_j) + \sum_i v_i \sin(ip_1\alpha + \phi_i);$$

$$\Delta\alpha_2 = \sum_j \mu_j \sin(j\alpha + \Psi_j) + \sum_i \mu_i \sin(ip_2\alpha + \Phi_i),$$

разностная погрешность каналов

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_1 - \Delta\alpha_2 = \sum_j [v_j \sin(j\alpha + \psi_j) - \mu_j \sin(j\alpha + \Psi_j)] + \sum_i [v_i \sin(ip_1\alpha + \phi_i) - \mu_i \sin(ip_2\alpha + \Phi_i)].$$

При определенном выборе  $p_1, p_2$ , в частности при  $p_2 = p_1 - 1$ , можно обеспечить  $ip_1 \neq ip_2$  для всех учитываемых  $i$ . Тогда, измерив  $\Delta\alpha$  в  $M$  угловых положениях, распределенных равномерно в пределах оборота, можно при помощи преобразования Фурье определить амплитуды  $v_i, \mu_i$  и начальные фазы  $\phi_i, \Phi_i$  гармоник погрешности каждого из каналов [11].

Гармоники длиннопериодной погрешности имеют одинаковый порядок для двух МВТ измерительной системы и не могут быть разделены автоматически по приведенной выше методике. Их определяют отдельно для каждого канала по традиционной методике с применением оптической призмы с небольшим числом граней. Далее информация о длиннопериодной погрешности заносится в память процессора и используется для коррекции кода угла.

При самокалибровке данные автоматически собираются при полном обороте вала. Отсчеты выходных кодов первого и второго каналов учитываются при равенстве кодов одного из каналов расчетным угловым положениям, равномерно распределенным в пределах оборота. Сбор данных с опорой на выходную информацию одного из каналов приводит к неравномерности взятия отсчетов вследствие погрешности данного канала. Ошибка определения параметров погрешности каналов незначительна для точных ДУ (исходная погрешность единицы — десятки угловых секунд). При больших значениях исходной погрешности каналов точность оценки параметров гармоник погрешности понижается и для сохранения эффективности данного подхода требуется применение более сложных методик [12].

Уменьшение влияния неравномерности взятия отсчетов в этих методиках может достигаться итерационно-многократным повторением процедуры калибровки с опорой на выходную информацию одного из каналов, скорректированную по результатам предыдущей итерации. Другой подход заключается в однократном выполнении процедуры калибровки, но с использованием более сложной модели погрешности, учитывающей неравномерность взятия отсчетов [12].

При системных ограничениях на угол поворота вала и невозможности сбора информации в пределах полного оборота самокалибровка проводится по модифицированной методике [13]. Методика включает предварительную (перед спектральным анализом) пространственную фильтрацию массива отсчетов и обеспечивает определение параметров внутрипериодной погрешности каналов при повороте вала в пределах нескольких зон точного отсчета (не менее двух).

Использование мехатронного системного подхода к разработке ЦПУ позволило пересмотреть традиционное распределение погрешностей между ДУ и электронным преобразователем, что дало возможность существенно повысить технологичность ДУ за счет снижения требований к точности их изготовления. От ДУ здесь не требуется максимальной точности, требуется лишь стабильность и повторяемость спектрального состава, а именно пространственной частоты гармоник погрешности. Для преобразователей нового поколения разработан ряд двухотсчетных ДУ с габаритными размерами, позволяющими удовлетворять потребности при различных применениях [14]. Основные параметры ДУ приведены в таблице.

Датчики угла состоят из двух МВТ с КЭР, различающимися на единицу. Принцип построения каждого МВТ основан на получении максимального  $p$ . Конструктивно МВТ выполняют плоским на сплошных магнитопроводах из магнитомягкого сплава с прямоугольными пазами равного шага. В пазах ротора размещается сосредоточенная волновая обмотка возбуждения типа «зубец-полюс», а в пазах статора — синусная и косинусная выходные обмотки типа «два зубца-полюс», которые обладают низким относительным значением индуктивности, обеспечивая преобразователю малую чувствительность к электромагнитным помехам. Оба МВТ изготавливают по единой технологии, конструкции их магнитопроводов отличаются лишь числом нарезанных пазов. Сплошные магнитопроводы обеспечивают жесткое объединение ДУ в единой конструкции и стабильность этой конструкции в условиях эксплуатации.

Размеры ДУ могут быть уменьшены (диаметры 50, 35 мм и менее). В этом случае при настоящем уровне технологии невозможно реализовать большое число полюсов и в результате с уменьшением размеров зубцовой зоны резко возрастают погрешности технологического характера. Использование новой структуры ЦПУ и самокалибровки позволяет существенно повысить точность преобразования (рис. 3) и создать на основе малоразмерных ДУ высокоточные ЦПУ для применения в жестких условиях эксплуатации [14].

Наличие в структуре ЦПУ высокопроизводительного процессора разрешает отказаться от использования микросхем специализированных преобразователей сигналов ДУ в код (resolver-to-digital converter), являющихся де-факто промышленным стандартом, но производимых в мире лишь двумя

Основные параметры датчиков угла

| Параметр                                                                                         | Датчик угла    |                 |                  |                  |                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|
|                                                                                                  | ДУ-71-3        | ДУ-100-63       | ДУ-160-100       | ДУ-280-205       | ДУ-500-400       |
| Коэффициент электрической редукции $p$ для МВТ-ТО1/МВТ-ТО2                                       | 32/31          | 64/63           | 128/127          | 128/127          | 128/127          |
| Погрешность преобразования угла, ", не более                                                     | $\pm 15$       | $\pm 10$        | $\pm 10$         | $\pm 10$         | $\pm 15$         |
| Габаритные размеры, мм:<br>наружный диаметр статора<br>внутренний диаметр ротора<br>осевая длина | 71<br>40<br>34 | 100<br>63<br>35 | 160<br>100<br>41 | 280<br>205<br>45 | 500<br>405<br>55 |
| Масса, кг, не более                                                                              | 0,46           | 0,8             | 2,7              | 7,0              | 35,0             |

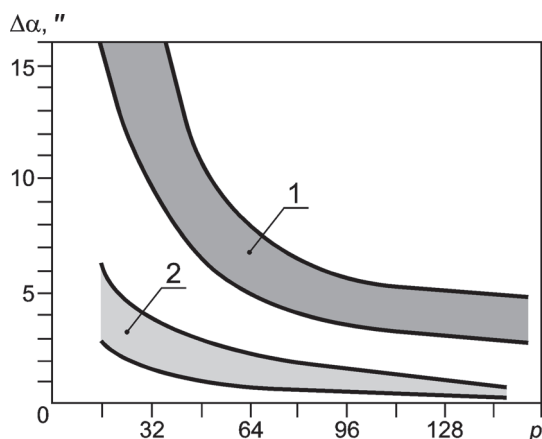


Рис. 3. Погрешность ЦПУ с традиционной (1) и новой (2) структурами в зависимости от коэффициента электрической редукции  $p$

фирмами (Analog Devices Inc., Data Device Corporation). В ЦПУ (рис. 2, б) синусный и косинусный сигналы ДУ преобразуются в цифровую форму при помощи АЦП общего назначения, а их функциональная обработка и формирование кодов угла осуществляются в ЦСП программно по следующим алгоритмам, аналогичным реализуемым в аппаратных решениях [15]. Структура ЦПУ демонизирована, поскольку может быть реализована на широко распространенной элементной базе. Она имеет существенные преимущества при миниатюризации аппаратуры электронного преобразователя сигналов ДУ, а также позволяет реализовать ЦПУ на отечественной элементной базе.

Использование мехатронного подхода к проектированию ЦПУ позволило на основе системной интеграции электро-механической и электронных частей разработать новые структуры преобразователя и алгоритмы обработки сигналов ДУ, которые кроме повышения точности и технологичности придали преобразователям новые функциональные возможности, в частности проведение самокалибровки и контроль достоверности вырабатываемой информации. Для преобразователей нового поколения разработана гамма двухотсчетных ДУ с габаритными размерами, обеспечивающими потребности в различных прикладных областях.

#### Л и т е р а т у р а

1. Домрачев В. М., Ипполитова Е. В. Двухотсчетные амплитудные цифровые преобразователи угла на базе гибридных микросборок серии 2602 // Измерительная техника. 2011. № 11. С. 16—19; Domrachev V. M., Ippolitova E. V. Dual reading tracking-type amplitude angle digitizer based on series 2602 hybrid microassemblies // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 11. P. 1233—1238.

2. Bergas-Jané J. a. e. High-Accuracy All-Digital Resolver-to-Digital Conversion // IEEE Trans. Electron. 2012. V. 59. N 1. P. 326—333.

3. Hoseinnezhad R., Bab-Hadiashar A., Harding P. Calibration of Resolver Sensors in Electromechanical Braking Systems: A Modified Recursive Weighted Least-Squares Approach // IEEE Trans. Electron. 2007. V. 54. N 2. P. 1052—1060.

4. Sarma S., Agrawal V. K., Udupa S. Software-Based Resolver-to-Digital Conversion Using a DSP // IEEE Trans. Electron. 2008. V. 55. N 1. P. 371—379.

5. Епифанов О. К. Современные электромеханические устройства безредукторных вентильных электроприводов // «Электропривод с вентильными двигателями»: Докл. науч.-практ. семинара. М.: Издат. дом МЭИ, 2007.

6. Vialatte C. Mesure de déplacement angulaire à  $2 \cdot 10^{-6}$  par résolver multipolaire // Rev. Techn. Thomson-CSF. 1983. V. 15. N 2. P. 559—576.

7. Analog-Digital Conversion Handbook / Ed. D. H. Sheingold. Englewood Cliffs (USA): Prentice-Hall, 1986.

8. Сафонов Л. Н. Измерители перемещений на основе двух разнополюсных датчиков // Измерительная техника. 1985. № 11. С. 12—13; Safonov L. N. Displacement meters based on two different sensors // Measurement Techniques. 1985. V. 28. N 11. P. 922—924.

9. Смирнов В. А. и др. Метод анализа точностных характеристик датчиков угла // Измерительная техника. 1991. № 4. С. 7—8; Smirnov V. A. e. a. A method of analysis of the precision characteristics of angle data transmitters // Measurement Techniques. 1991. V. 34. N 4. P. 322—324.

10. Хрущев В. В. Электрические микромашины автоматических устройств / Учебн. пособие для вузов. Л.: Энергия, 1976.

11. Пат. 2235422 РФ. Способ преобразования угла поворота вала в код / В. Д. Аксененко, Д. В. Аксененко // Изобретения. Полезные модели. 2004. № 24.

12. Аксененко В. Д., Матвеев С. И. Повышение точности автокалибровки преобразователей угол-код // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 10. С. 41—46.

13. Пат. 2266614 РФ. Способ преобразования угла поворота вала в код / В. Д. Аксененко, В. М. Зиненко, С. И. Матвеев // Изобретения. Полезные модели. 2005. № 35.

14. Епифанов О. К. и др. Комплексные решения высокоточного цифрового преобразования угловых перемещений в аппаратуре межотраслевого применения / Труды Всерос. науч.-практ. конф. «Датчики и системы — 2006». Пенза: ФНПЦ ФГУП «НИИ физических измерений», 2006.

15. Аксененко В. Д., Аксененко Д. В., Матвеев С. И. Преобразователь угла в код на основе цифрового сигнального процессора // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2001. Т. 44. № 8. С. 37—42.

Дата принятия 04.05.2012 г.