

Sokolov Sergey Mikhailovich – Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences; e-mail: sokolsm@keldysh.ru; 143900, Moscow region, Balashikha, Nekrasov street, 11-17, Russia; phone: +79161220113; dr. of phys.-math. sc.; professor; head of division.

Boguslavsky Andrey Alexandrovich – e-mail: boguslav@keldysh.ru; 140410, Moscow region, Kolomna, Zekenaya street, 40-3, Russia; phone: +79167379448; dr. of phys.-math. sc.; senior lecturer; leader scientist.

УДК 681.5

Ю.С. Смирнов, Е.В. Юрасова, А.С. Макеева

**РАСШИРЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ «УГОЛ–ПАРАМЕТР–КОД»
В СВЕТЕ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

Работа посвящена особенностям построения преобразователей «угол – параметр – код» (УПК). Показано, что традиционная структура, позволяющая формировать из выходных сигналов синусно-косинусного вращающегося трансформатора (СКВТ) только цифровой эквивалент перемещения достаточно проста. Современные зарубежные «Resolver-to-Digital Converter (RDC)» формируют, в отличие от одноканального варианта, цифровой эквивалент скорости. Это упрощает электромеханическую компоненту мехатронных систем (МС) за счет исключения тахометра, связанного с рабочим механизмом и исполнительным электродвигателем через механическую передачу или непосредственно. В последнем случае традиционное использование тахометра на низких частотах вращения связано с принципиальными трудностями получения достоверной информации о скорости перемещения. Это ограничивает области применения прогрессивного безредукторного электропривода. Представленные построения своим непрерывным совершенствованием обязаны многочисленным применениям СКВТ. Их «долгожительство» определено замечательными свойствами, которые не превзойдены современными датчиками угла, основанными на иных физических принципах. До появления цифровых систем сельсины и СКВТ были наиболее точными и надежными аналоговыми первичными преобразователями углового положения. Созданные на основе этих преобразователей МС удовлетворяют самым высоким стандартам и способны успешно функционировать в широком диапазоне воздействий окружающей среды: температуры, влажности, вибраций и ударов. В силу этого с появлением цифровых систем, естественно, стали предприниматься попытки создания преобразователей с цифровым выходом, в которых базовый первичный преобразователь сохранялся. Развитие этого направления оказалось чрезвычайно успешным: в настоящее время созданы зарубежные и отечественные RDC, соперничающие с цифровыми кодирующими преобразователями в разрешении, точности и динамических показателях. По совокупности требуемых характеристик с ними не могут конкурировать никакие разновидности конвертеров угла.

Сельсины; синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы; мехатронные системы; Resolver-to-Digital Converters; сенсоры электромашинные; оптоэлектронные и магнитного поля; энергоинформатика; единое информационное обеспечение.

Yu.S. Smirnov, E.V. Yurasova, A.S. Makeeva

**EXTENDING FUNCTIONALITY “ANGLE-PARAMETER-CODE”
TRANSDUCERS IN THE CONTEXT OF THE THEORY OF RELATIVITY**

The research is devoted to the peculiarities of construction of “angle-parameter-code” transducers. It is shown that the traditional structure to form only a digital equivalent of movement from the output signals of the angle-component solver is rather simple. Modern foreign “Resolver-to-Digital Converters” (RDC) form, unlike the single-channel analogue, a digital equiva-

lent of speed. This simplifies an electromechanical component of mechatronic systems (MS) by eliminating the tachometer connected with the working mechanism and the actuating motor through a mechanical transmission or directly. In the latter case, the traditional use of the tachometer at low revolutions occurs due to fundamental difficulties of receiving reliable information about the traverse speed. This limits scopes of application of a progressive gearless electric drive. Presented developments are beholden for their continuous improvement to numerous applications of the angle-component solver. Their durability is defined by remarkable properties which are not surpassed by modern angle-data transmitters based on other physical principles. Before the advent of digital systems synchro and angle-component solver were the most accurate and reliable analog primary transducers of the angular location. Mechatronic systems created on the basis of these transducers meet the highest standards and are able to operate successfully in a wide range of environmental factors – temperature, humidity, vibration and strokes. Due to the advent of digital systems aroused attempts of the creation of converters with a digital output, in which a basic primary transducer maintained. The development of this area proved to be extremely successful – currently established foreign and domestic RDC compete with code converters in a resolving capacity, accuracy and dynamic indicators. On a set of required characteristics no type of angle converters can compete with them in certain cases.

Selsyns; sin-cosine rotary transformer; mechatronic systems; Resolver-to-Digital converter; rotary, optoelectronic and magnetic fields sensors; energoinformatics; Common Dateware mechatronic.

Введение. Замечательным свойством СКВТ является то, что независимо от физической природы сенсора (электромашинной, оптико-электронной или магнитного поля), его ортогональные выходные сигналы, при соответствующей запитке, содержит достоверную информацию о величине, скорости и ускорении его подвижной части, связанной с рабочим механизмом.

Анализ публикаций в рассматриваемой области свидетельствует о том, что большинство из них [1–9] посвящено применению различных построений конвертеров угла для мехатроники. Публикации [10–14] рассматривают методы и способы обработки формируемой информации. Работы [15–23] предлагают пути повышения функциональных возможностей угловых конвертеров. Публикации [24–29] носят рекламный характер и содержат показатели зарубежных [24–27] и отечественных [28, 29] микросхем, формирующих на выходе цифровые эквиваленты перемещения и его скорости с разрешением 16 бит.

Показано, что имеющие место достижения [24–29] не используют полностью функциональных возможностей единого информационного обеспечения, являющегося проявлением теории относительности [30] в областях мехатроники [1–9] и энергоинформатики [31]. В работах [21–23] обосновывается соответствие единого информационного обеспечения с СКВТ или резольвером постулату о связи пространства и времени теории относительности, обнаруженной в 1916 г. Очевидность этого факта подтверждается размерностями формируемых составляющих углового перемещения, измеряемого в градусах, скорости его изменения – в градусах за секунду, и ускорения – в градусах за секунду в квадрате.

Принцип единого информационного обеспечения на основе СКВТ предложен в [17]. Особенности построения фазового мультикомпонентного конвертера и его динамика рассмотрены в [18]. В докладе [19] была обоснована целесообразность расширения функциональных возможностей конвертации на основе мультифункционального амплитудного варианта единого информационного обеспечения. В докладе [20] представлен микроконтроллерный вариант полифункционального конвертера.

1. Формат синусно-косинусного вращающегося трансформатора. Из первичных преобразователей, основанных на принципе электромеханического преобразования энергии, наибольшее распространение получили различного типа СКВТ или резольверы. Они выпускаются с обмотками на статоре и роторе, двухполюс-

ные, многополюсные, с разным числом полюсов (двумя ступенями отсчета) и с бесконтактным возбуждением на базе кольцевого трансформатора (рис. 1,а). Первичная обмотка кольцевого трансформатора размещается на статоре, а вторичная – на роторе. Принцип работы бесконтактного резольвера иллюстрирует диаграммами (рис. 1,б). Есть СКВТ и резольверы с безобмоточным зубчатым ротором, которые называют верньерными резольверами, или редуктосинами [4, 6]

Обычно резольвер имеет на роторе обмотку возбуждения, магнитно-связанную с двумя обмотками на статоре, сдвинутыми относительно друг друга на электрический угол, равный 90° . Статор кольцевого трансформатора питается от источника переменного тока с напряжением $U_{RT} = U_{RTm} \sin(\omega t + \varphi)$, частотой возбуждения ω и фазовым сдвигом φ . Токи статора и ротора КТ соответственно равны I_{sRT} и $I_{rRT} = I_{rRTm} \sin \omega t$.

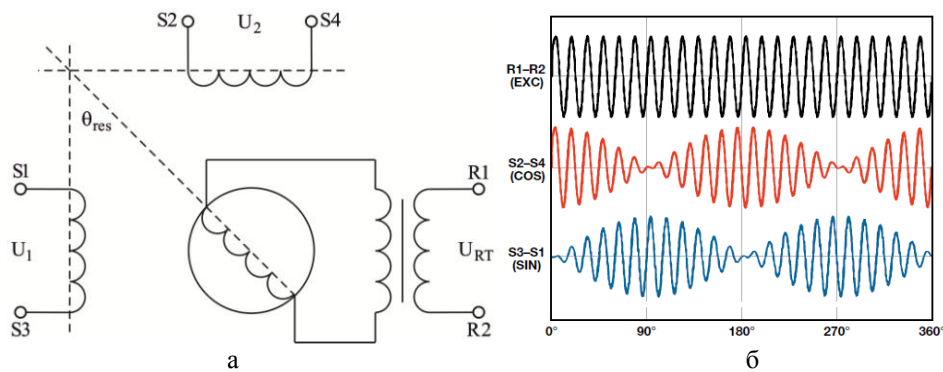


Рис. 1. Бесконтактный СКВТ (а) и его запитка пульсирующим полем

Напряжения U_1 и U_2 содержат компоненты ЭДС движения (первые слагаемые), зависящие от частоты возбуждения $\omega (I_{rRT} = I_{rRTm} \sin \omega t)$, скорости Ω_{me} и положения $\theta_{res} = p_{res} \theta_{me}$, и компоненты трансформаторных ЭДС, зависящие от частоты возбуждения $\omega (sI_{rRT} = I_{rRTm} \omega \cos \omega t)$ и положения. Это свойство сигналов U_1 и U_2 позволяет уменьшить погрешность датчика от ЭДС движения. При одновременном считывании обоих сигналов U_1 и U_2 при $\sin \omega = 0$ и $\cos \omega = 1$ ток возбуждения ротора равен нулю: $I_{rRTm} = 0$, а его производная максимальна: $sI_{rRT} = I_{rRTm} \omega \cos \omega t = I_{rRTm} \omega$. Поэтому в напряжениях U_1 и U_2 компоненты ЭДС движения будут отсутствовать, а оставшиеся компоненты будут зависеть от положения и иметь максимальную амплитуду $U_m = L_m I_{rRTm} \omega$.

В этом случае выходные сигналы СКВТ или резольвера можно представить в виде: $U_1 = \sin \omega t \sin \Theta$, $U_2 = \sin \omega t \cos \Theta$. Вариации амплитуды опорного сигнала в ряде ситуаций изменения его частоты могут вызвать появление погрешностей. Дополнительными источниками погрешностей в этих электромеханических системах являются также высшие гармоники и квадратурные составляющие. Для идеальной системы фазовые сдвиги φ равны нулю, и в большинстве систем их можно не учитывать. Специально предусмотренными мерами можно ослабить также и влияние многих других источников погрешностей [5–7]. Формат СКВТ позволяет сформировать две разновидности поля электромашины: вращающееся и пульсирующее. Первый режим именуется фазовым, а второй – амплитудным [4, 17].

2. Преобразователь «угол–фаза–код». При включении СКВТ в режиме вращающегося поля (рис. 2,а) обе его первичные обмотки возбуждаются генератором гармонических сигналов $GGG \sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$. Компараторы $AD1$ и $AD2$ совместно с логической схемой последовательного логического автомата Log формируют последовательности импульсных сигналов $Com1$, $Com2$ и $Gate$, представленные на временных диаграммах соответственно для вращения в прямом (рис. 2,б) и обратном (рис. 2,в) направлениях.

Основную роль на точность формирования конвертации угла поворота Θ ротора СКВТ или резольвера R играет N -разрядный счетчик мерных импульсов $Cntr$ (рис. 2,а), управляемый сигналом $Gate$, сформированным на выходе Log . В зависимости от направления вращения СКВТ счетчик $Cntr$ формирует N -разрядный код, пропорциональный углу Θ поворота ротора. Мерные импульсы на выходе генератора импульсов G должны иметь кварцевую стабильность частоты. Представленная на рис. 2,а схема, является предельно простым вариантом, иллюстрирующим связь пространства, представленного движением ротора во времени, эквивалентом которого служит число накопленных в $Cntr$ импульсов стабильной частоты генератора G .

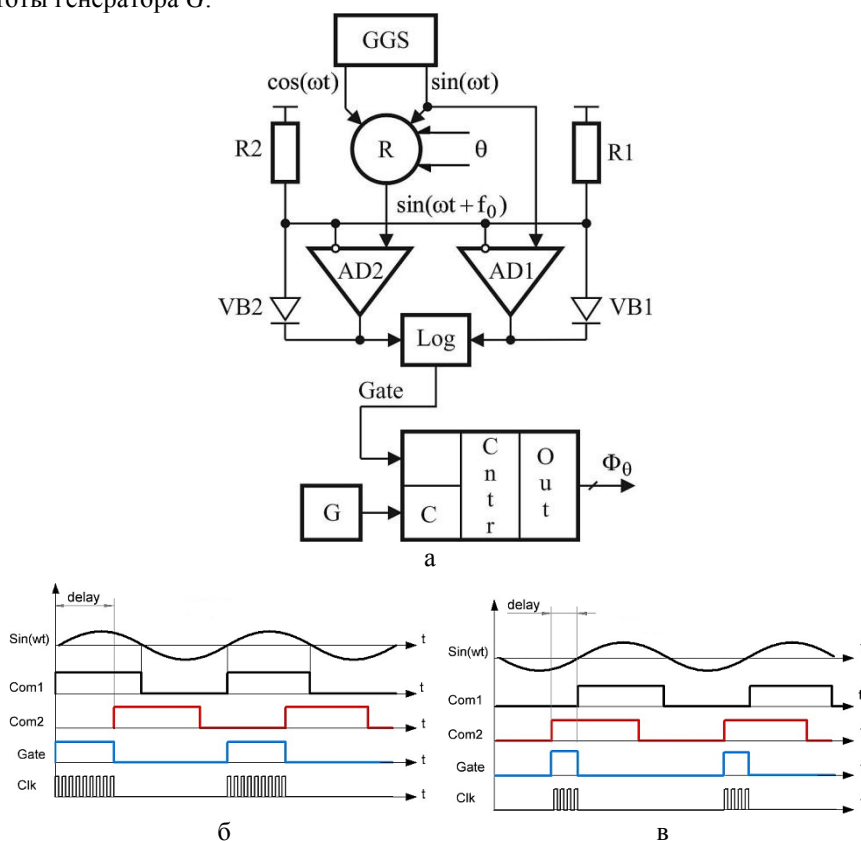


Рис. 2. Преобразователь «угол–фаза–код» (а) и диаграммы его работы в прямом (б) и обратном (в) направлении изменении угла

В [14] приведен математический синтез моделей последовательностных автоматов Muga and Mily для корректного формирования пачек прямоугольных импульсов из их непрерывной последовательности с помощью асинхронных стаби-

лизирующих сигналов без искажения длительностей и количества импульсов в пачке. Показано, как на основе анализа карт *Karno-Veicha* синтезированного последовательностного автомата следует мотивированно выбирать элементную базу для практической реализации. Корректный подход позволяет существенно повысить разрешающую способность RDC, доведя ее до 20 двоичных разрядов.

Важно отметить, что фазовый режим конвертации имеет, в отличие от амплитудного, ограничения, которые затрудняют его применение с первичными измерительными преобразователями генераторного типа: оптоэлектронными и магнитного поля. Это положение наглядно подтверждается на примере разработки микросхемы K1382НХ045 и K138НХ034, сложность которых достаточно трудно оправдать большим количеством возможных применений, предлагаемых разработчиками [28].

Целесообразным становится изучение результатов накопленного опыта разработки и многолетней эксплуатации преобразователей «угол–параметр–код». Анализ зарубежного опыта в этой области свидетельствует о целесообразности преимущественного использования амплитудных структур как с точки зрения повышения функциональных возможностей, так и выходных показателей при одновременном снижении габаритов и энергопотребления.

Особое место среди однокомпонентных преобразователей «угол–параметр–код» занимают структуры, использующие \arctg -преобразование, при котором используется квадрантное или октантное разбиение диапазона преобразования углового перемещения. В первом случае тригонометрическое преобразование реализуется цифровым сигнальным процессором [5, 6], а во втором – посредством ПЗУ с \arctg прошивкой [17].

3. Преобразование с цифровым сигнальным процессором. Простота схемотехнических решений, высокое быстродействие и удобство управления приводом с ШИМ достигаются в преобразователе «угол–амплитуда–ШИМ» с простейшим из алгоритмов – четырех квадрантным \arctg -преобразованием сигналов [6]: $P_{\text{res}} \ominus_{\text{mc}} = \arctg_4(U_2/U_1)$.

Необходимые вычисления производятся путем программной реализации в цифровых сигнальных процессорах или микроконтроллерах. Разложение в ряд функции $\arctg(x)$ осуществляется по формуле [12]:

$$\arctg(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot x^{2k+1} / (2k+1).$$

В диапазоне углов $0 \dots 45^\circ$ для разрешения 20 разрядов достаточно 5 первых членов ряда, взятых с 32-разрядной точностью. Таким образом, после измерения с помощью АЦП вычисление угла и его представление в форме от 0 до 1 для значений от 0 до 2π займёт 2 операции нормализации, одно деление, 5 умножений, до 8 сложений и до 7 логических переходов по короткому адресу. В общей сложности, не более 40 тактов процессора типа ARM Cortex-M3. Для сокращения вычислений используется формула Герона. Вычисления являются целочисленными (32 разряда) с нормализацией до 16 разрядов.

При вычислении табличным способом, по измеренным значениям U_{sin} и U_{cos} определяется октант, в котором находится искомый угол, и по отношению значений $|U_{\text{sin}}|$ и $|U_{\text{cos}}|$ искомый угол вычисляется по одной из формул:

- ПРИ $U_{\text{sin}} > 0$ и $U_{\text{cos}} > 0$ и $|U_{\text{sin}}| < |U_{\text{cos}}|$, то $\varphi = \alpha$,
- ПРИ $U_{\text{sin}} > 0$ и $U_{\text{cos}} > 0$ и $|U_{\text{sin}}| > |U_{\text{cos}}|$, то $\varphi = \pi/2 - \beta$,
- ПРИ $U_{\text{sin}} < 0$ и $U_{\text{cos}} > 0$ и $|U_{\text{sin}}| > |U_{\text{cos}}|$, то $\varphi = -\beta$,
- ПРИ $U_{\text{sin}} > 0$ и $U_{\text{cos}} > 0$ и $|U_{\text{sin}}| < |U_{\text{cos}}|$, то $\varphi = -\pi/2 + \beta$,

ПРИ $U_{sin} > 0$ и $U_{cos} < 0$ и $|U_{sin}| > |U_{cos}|$, то $\varphi = \pi/2 + \beta$,

ПРИ $U_{sin} > 0$ и $U_{cos} < 0$ и $|U_{sin}| < |U_{cos}|$, то $\varphi = \pi - \beta$,

ПРИ $U_{sin} < 0$ и $U_{cos} < 0$ и $|U_{sin}| < |U_{cos}|$, то $\varphi = -\pi + \beta$,

ПРИ $U_{sin} < 0$ и $U_{cos} < 0$ и $|U_{sin}| > |U_{cos}|$, то $\varphi = -\pi/2 + \beta$,

где β – угол в диапазоне $0 \dots 45^\circ$ ($0 \dots \pi/4$).

Далее вычисляется значение $\text{tg}(\beta) = |U_{sin}|/|U_{cos}|$ и по таблице, в зависимости от $\text{tg}(\beta_1)$, находится значение β_1 , где $\text{tg}(\beta_1)$ – ближайшее меньшее табличное значение тангенса угла, и искомый угол $\beta = (\text{tg}(\beta) - \text{tg}(\beta_1))(C_0 + C_1 \times \beta_1 + C_2 \times \beta_1^2)$, где C_0, C_1, C_2 – поправочные коэффициенты коррекции функции ошибки алгоритма. Такой способ обеспечивает разрешение 16 разрядов при размере таблицы в 256 значений.

Для уменьшения шумов квантования часто используют RDC. Они преобразователи представляют собой замкнутые следящие системы, синтезирующие цифровые синусно-косинусные сигналы с подстройкой их фазы θ_{resd} под фазу θ_{res} выходных сигналов резольвера или СКВТ после их синхронного детектирования. Эти системы выполняются или в виде специальных цифроаналоговых микросхем, или в виде программно-реализованных следящих систем в цифровых сигнальных процессорах [5]. Типичная максимальная скорость слежения RDC при разрешении 16 бит составляет 1000 об/мин, а погрешность слежения $\pm 2' + 1 \text{ LSB}$, что соответствует $\pm 7 \text{ LSB}$ при 16-битовом разрешении.

Резольверы или СКВТ используются преимущественно в специальных изделиях с тяжелыми условиями эксплуатации. В то же время они уступают оптическим энкодерам по быстродействию и точности. Частота их возбуждения составляет от 50 Гц до 350 кГц, а угловая погрешность лежит в пределах $5 \dots 0,1'$.

Эффективный метод компенсации погрешностей СКВТ или резольвера – калибровка [6]. Используя стандартные 14-разрядные АЦП, от датчика с коэффициентом электрической редукиции 64, при стандартном арктангенсном преобразовании и синхронном детектировании получаем разрешение около $1,5''$. Высокое разрешение полученной информации не обеспечивает, тем не менее, достаточной точности. Сказывается наличие эксцентриситета ротора, несимметрии обмоток, высших гармоник в магнитодвижущей силе обмоток и магнитной проводимости зазора и потерь в стали. На рис. 3, показана кривая **a** погрешности $e_r = \theta_{enc} - \theta_{resme}$ резольвера, снятая с помощью высокоточного энкодера, при

этом θ_{resme} – положение, вычисленное по данным резольвера; θ_{enc} – положение,

вычисленное по данным энкодера. Повторяемость показаний резольвера позволяет применить коррекцию по данным энкодера, которую для экономии памяти и ускорения расчетов удобно представить рядом Фурье [6]. Коррекция \hat{e} зависит от погрешности энкодера e_{enc} и требуемой погрешности резольвера e_r :

$\hat{\theta}_{resme} = \theta_{resme} + \hat{e}$. На рис. 3 представлена и кривая **b** погрешности e_r того же резольвера после введения коррекции \hat{e} . Видно, что погрешность уменьшилась примерно на порядок.

4. Преобразователь «угол–амплитуда–код» с арктангенсным ПЗУ. Применение цифровых сигнальных процессоров или микроконтроллеров для вычисления функции $\beta = \text{arctg}(x)$ алгоритмическим или табличным способом в пределах октанта приводит к снижению, скорости конвертации. Поэтому в быстродействующих МС следует отдавать предпочтение преобразователю УПК с ПЗУ. В МС, не требующих «автофазирования» [6] можно использовать упрощенный алгоритм конвертации с arctg ПЗУ [17].

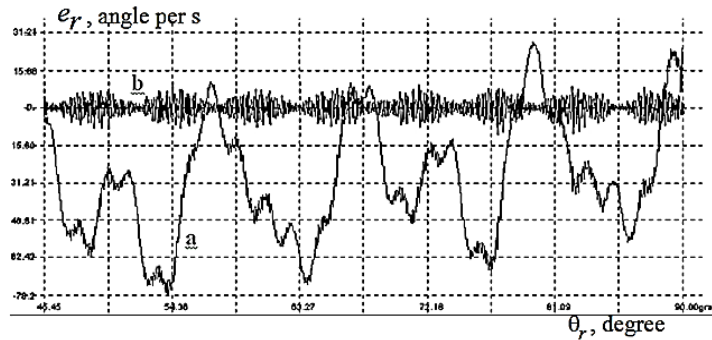


Рис. 3. Погрешность резольвера до калибровки (а) и после нее (б)

Октантное представление полного диапазона преобразования, вместо квадратного, при одинаковом быстродействии позволяет дополнительно сформировать 1 старший по весу разряд угла Θ . Это важно в случае построения двухотсчетного преобразователя УПК, в котором дополнительный разряд используется для согласования точного и грубого отсчетов МС. Скорость конвертации выходных сигналов СКВТ в цифровой эквивалент перемещения, и в этом случае, определяется быстродействием аналого-цифрового преобразователя отношения напряжений (АЦПОН) внутри октанта.

В схеме, представленной на рис. 4, на первом этапе преобразуются выходные сигналы СКВТ в код тангенса угла $tg\beta = U_s / U_c$, где β – угол поворота Θ , приведенный в первый октант. Одновременно осуществляется формирование трех старших разрядов угла Φ_Θ .

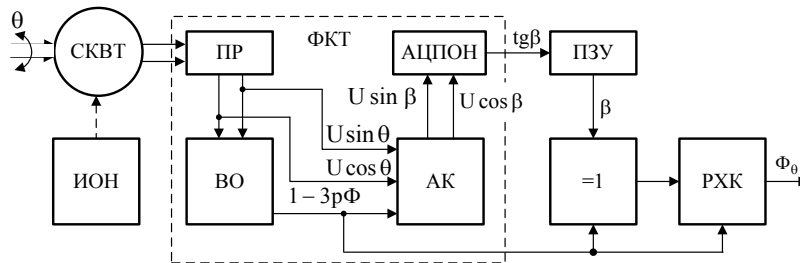


Рис. 4. Преобразователь «угол–амплитуда–код» с арктангенсным ПЗУ

Работает преобразователь следующим образом. На входы аналогового коммутатора АК и выявителя октантов ВО поступает два сигнала, пропорциональные текущему значению синуса $U\sin\Theta$ и косинуса $U\cos\Theta$ угла Θ . Их предварительное преобразование осуществляет преобразователь PP выходных сигналов СКВТ. Три старших разряда кода угла Θ формируются из номера октанта. Путем сравнения выходных сигналов СКВТ между собой и с нулевым уровнем определяют номер октанта, в котором находится угол Θ поворота вала СКВТ. Первым принят октант, в котором $\sin\Theta > 0$, $\cos\Theta > 0$, а $\sin\Theta < \cos\Theta$. Номер октанта возрастает против часовой стрелки. По известному номеру октанта определяют сигналы, пропорциональные синусу и косинусу угла Θ , приведенного в первый октант:

$$\sin\beta = |\sin\Theta|, \cos\beta = |\cos\Theta| \text{ – в 1, 4, 5-м и 8-м октантах;}$$

$$\sin\beta = |\cos\Theta|, \cos\beta = |\sin\Theta| \text{ – во 2, 3, 6-м и 7-м октантах.}$$

Путем линейного аналого-цифрового преобразования определяют код тангенса угла β , при этом в качестве опорного сигнала в АЦПОН используется сигнал, пропорциональный $\cos\beta$, а в качестве измеряемого – $\sin\beta$. Быстродействие и точность такого преобразователя определяются показателями формирователя кода тангенса ФКТ, на вход которого поступают сигналы от СКВТ, который запитывается гармоническим, прямоугольным, трапецеидальным или треугольным напряжением от источника опорного напряжения ИОН [18].

Его построение на интегральных микросхемах рассмотрено в [17]. С выхода АЦПОН код $\text{tg}\beta$ поступает на адресные входы постоянного запоминающего устройства ПЗУ, запрограммированного по закону арктангенса в диапазоне углов $0.. \pi/4$ (рис. 5,а). ПЗУ осуществляет функциональное преобразование входной величины $\arctg(\text{tg}\beta) = \beta$, т.е. формирует на выходе код угла β . Нулевому входному коду $\text{tg}\beta$ соответствует максимальный код угла β (рис. 5,б) $M_{\max} = 2^j - 1$,

где j – разрядность ПЗУ. Код тангенса приведенного угла β поступает на адресные входы ПЗУ, которое используется в устройстве преобразования кода $\text{tg}\beta$ в код угла β .

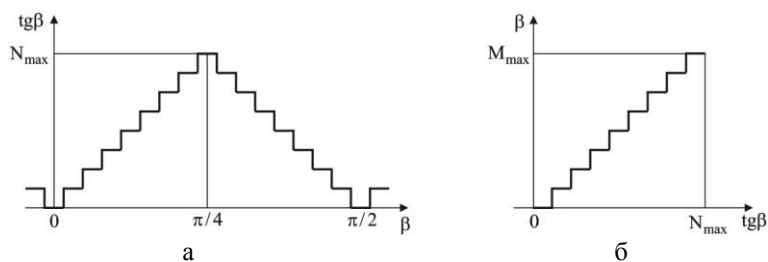


Рис. 5. Диаграммы арктангенсного преобразования

Код угла β поступает на вход схемы ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ, другой вход которой управляется младшим разрядом кода октантов. Таким образом, в нечетных октантах, когда младший разряд кода октантов равен нулю, на выход схемы ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ проходит прямой код угла β , а в четных октантах, когда младший разряд кода октантов равен единице, на выходе этой схемы формируется инверсный код угла β , дополняющий угол β до $\pi/4$, т.е. равный $(\pi/4 - \beta)$. С выхода схемы ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ код угла β или $(\pi/4 - \beta)$ подается на один вход регистра хранения кода РХК (см. рис. 4), на другой вход которого с выхода ВО поступает код октантов. В результате суммирования кодов на выходе РХК формируется код угла Φ_θ .

Более чем двукратное повышение точности преобразования достигается при одновременном упрощении его схемного построения. Снижение инструментальной составляющей ошибки за счет исключения дополнительного преобразователя код – напряжение дает увеличение точности не менее чем в 2 раза, а исключение методической составляющей ошибки позволяет еще более повысить точность преобразования. С точки зрения упрощения наиболее существенным следует считать использование одного АЦПОН и применение только стандартных интегральных микросхем, что снижает его стоимость. Существенным преимуществом такого построения является его реализуемость на стандартной элементной базе без применения дополнительных корректирующих логических устройств ПЗУ, что ведет к упрощению устройства и повышению технологичности его изготовления.

Немаловажным фактором является и экономия емкости ПЗУ, которая при одинаковой разрядности выходного кода составляет не менее 25% по сравнению с вариантом синусно-косинусного ПЗУ. При импульсной запитке ПЗУ снижается потребляемая мощность, что способствует реализации устройства в виде модуля на основе гибридной или интегральной технологии.

Быстродействие этого преобразователя УПК близко к 10^5 преобразований в секунду и определяется скоростью работы АЦПОН. Повышению быстродействия последних в настоящее время уделяется большое внимание, поэтому в ближайшем будущем реально достижимо увеличение их скорости работы на порядок. Дальнейшее повышение быстродействия достигается в параллельных АЦПОН.

5. Расширение областей применения. В связи с ростом стоимости СКВТ и резольверов появился ряд применений для упрощенных вариантов первичных преобразователей линейных и угловых перемещений [29]. Второй областью применения преобразователей УПК стали устройства передачи информации от сельсинов, традиционно применяющиеся преимущественно в аналоговых системах передачи измерительной информации. Поэтому дальновидные разработчики RDS [29] предусмотрели их сопряжение с первичными преобразователями, формат выходных сигналов которых отличен от СКВТ. Реализовано взаимодействие с двухотсчетным сенсором, использующим механическую или электрическую редукцию.

Для ограниченных линейных перемещений применяют индуктивные датчики линейных перемещений LVDT, аналогично которым построены датчики, фиксирующие угловое перемещение, их принято именовать RVDT [29]. Однако, RVDT имеют ограничение рабочей зоны двумя квадрантами, то есть позволяют определить угол поворота в секторе $\pm 90^\circ$. Это затрудняет их использование в мехатронике и робототехнике для определения положения ротора электродвигателя и сопряженного с ним рабочего механизма. Для этих целей используются сельсины и СКВТ. За рубежом последние именуются Resolvers, что переводится как «решающий прибор», нашедший первоначально широкое применение в навигационных электромеханических вычислителях, осуществляющих преобразование координат на основе тригонометрических соотношений [17].

Сельсин питается от источника переменного напряжения. Информация об угловом положении вала обычно представляется в виде модулированных сигналов переменного тока. В большинстве устройств эти сигналы не нуждаются в нормализации. Они менее подвержены помехам и наводкам из контуров заземления, нежели обычные аналоговые сигналы. Поэтому проблемы ввода в эксплуатацию для них менее серьезны, чем для многих других систем, включая и устройства кодирования угла. Немаловажным фактором, способствующим проведению работ по созданию преобразователей УПК на основе сельсинов и СКВТ, является обеспечение совместимости аналоговых и цифровых систем путем использования единого первичного датчика. Информация о взаимном положении ротора сельсина относительно статора заключена в системе трехфазных сигналов, а в СКВТ – двухфазных. Обмотки СКВТ уложены так, что на несущей частоте одна формирует сигнал, пропорциональный синусу угла поворота вала Θ , а вторая – сигнал, пропорциональный косинусу этого угла. Рассматриваемые далее принципы построения преобразователей преимущественно используют входную информацию в формате СКВТ. С помощью трансформатора Скотта типа Т трехфазный сигнал со статора сельсина-датчика либо дифференциального сельсина можно преобразовать в сигнал формата СКВТ (рис. 6,а). На первичных обмотках сигналы несущей частоты фактически трехфазные. Ту же частоту имеют и выходные сигналы. Напряжения на вторичных обмотках пропорциональны $\sin\Theta$ и $\cos\Theta$.

С точки зрения миниатюризации аппаратуры интерес представляют построения преобразователя трехфазного сигнала сельсина в двухфазный сигнал формата СКВТ (преобразователи координат) на интегральных схемах, входящие в состав RDS [29]. Векторная диаграмма преобразователя приведена на рис. 6,б. Для приведения трехфазных напряжений к формату СКВТ необходимо решить уравнения: $U_S = \sqrt{3} \cdot \sin \Theta$, $U_C = \sqrt{3} \cdot \cos \Theta$. Схема, обеспечивающая решение этих уравнений, представлена на рис. 6,в.

Операционный усилитель *OY1* с цепями обратной связи обеспечивает усиление $\sqrt{3}$ раз для получения необходимой амплитуды U_S . Коэффициент передачи $\sqrt{3}$ задается резисторами *R3* и *R2*. Операционный усилитель *OY2* с входными элементами и цепями обратной связи обеспечивает формирование U_C . Коэффициент передачи *OY2* задается резисторами *R4–R7*, которые могут иметь один номинал. Точность получения выходных напряжений определяется точностью резисторных цепей. В системах высокой точности отношение сопротивлений резисторов *R3/R2*, *R5/R4* и *R7/R6* должно выдерживаться с погрешностью не более 0,01%, что достаточно просто реализуется при использовании резистивных матриц. Возможен иной вариант построения преобразователя координат, схема которого представлена на рис. 6,г. Выходной сигнал операционных усилителей: $U_{\text{вых}OY1} = 1,732 \cdot R_4 / R_3 \cdot U_{\text{max}} \sin \theta$, $U_{\text{вых}OY2} = U_{\text{max}} \cos \theta$, где U_{max} – максимальное межфазное напряжение.

Если сопротивления всех резисторов одинаковы, выходной сигнал *OY2* равен удвоенному входному напряжению, умноженному на косинус угла. Например, если угол составляет 33° , а входное напряжение (между линиями, трехфазный вход) равно 1 В, то выходное напряжение *OY1* составит $2 \times 1 = 2$; $2 \times 0,8387 (\cos 33^\circ) = 1,6774$ В. При тех же самых условиях (угол 33° , входное напряжение 1 В) выходное напряжение *OY2* составляет $1,732 \times 0,5446 (\sin 33^\circ) \approx 0,94$ В. Точность передачи сигналов по схеме рис. 6,г зависит от степени согласования обоих ОУ, а также от согласованности резисторов, допуск на которые должен быть не хуже 1%. Для этой и предыдущей схем идеально подходит двухканальный интегральный ОУ, в котором оба канала формируются на одном кристалле. Однако удовлетворительные результаты можно получить и при отдельных ОУ со строго согласованными характеристиками.

Схема рис. 6,г наиболее эффективно действует при напряжении всех трех фаз порядка одного вольта или долей вольта. По выходному напряжению 5...10 В она согласуется с входными цепями интегральных микросхем. Схема имеет некоторые преимущества относительно прямого измерения фазовых углов с помощью измерительного прибора. Во-первых, ОУ создают гораздо меньшую по сравнению с измерительным прибором нагрузку (что более важно для низковольтных систем, чем для трехфазных систем с напряжением в диапазоне 120 В). Во-вторых, работа этой схемы не зависит от частоты сигнала. Большинство же измеряющих фазовые углы приборов предназначено только для одной частоты. В-третьих, выходной сигнал может быть «взвешенным» или «промасштабированным». Например, в некоторых конструкциях может потребоваться домножить выходной синусоидальный сигнал на 5, а косинусоидальный сигнал – на 10 или наоборот. Это можно получить, установив различные коэффициенты усиления отдельных ОУ, меняя соотношения *R2/R1* и *R4/R3*.

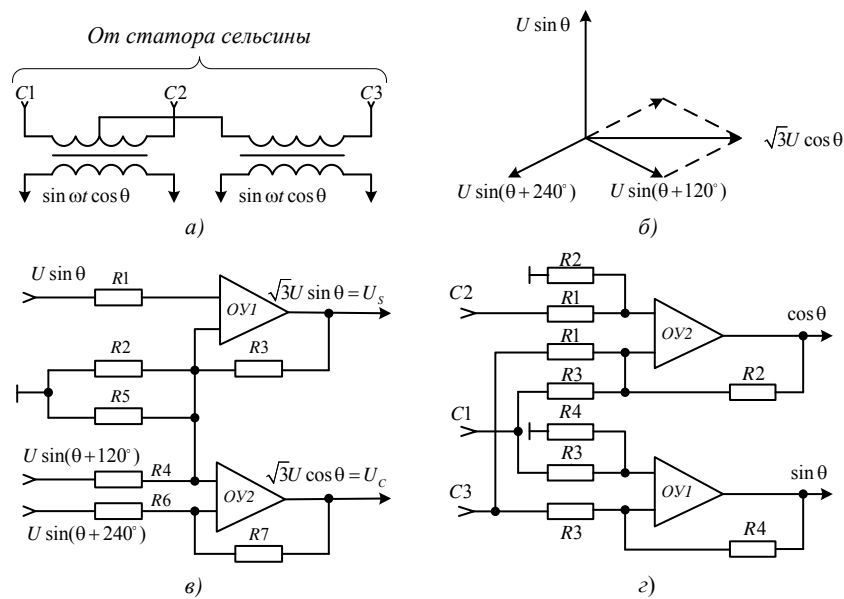


Рис. 6. Схемотехника преобразователей координат

Как обычно, номиналы входных резисторов $R1$ и $R4$ выбираются исходя из входного тока смещения и падения напряжения. Одинаковый номинал следует использовать для всех входных резисторов. Создаваемое входным током смещения падение напряжения на входных резисторах должно составлять не более 10 % входного линейного напряжения. Номиналы резисторов $R2$ и $R3$ выбираются исходя из требуемых коэффициентов усиления для отдельных выходов. Номиналы резисторов $R2$ и $R4$ должны быть примерно одинаковыми.

Номиналы элементов приведенной на рис. 6,г схемы выбираются такими, чтобы она обеспечивала выходные сигналы для трехфазной системы $\overline{C1}$, $\overline{C2}$, $\overline{C3}$ при максимальном линейном напряжении 2 В, входном токе смещения ОУ 200 нА; при этом синусоидальный выходной сигнал не должен превышать 3,5 В, а косинусоидальный выходной сигнал – 10 В. Для этого напряжения источника питания ОУ2 должны быть по крайней мере 10 В, на практике они бывают 11–12 В. Для ОУ2 можно использовать и меньшее значение. Однако лучшее согласование и, следовательно, более точная схема получаются в том случае, если оба ОУ имеют одинаковые напряжения питания.

Для амплитуды опорного несущего напряжения U_0 частоты ω выходные сигналы в формате СКВТ составляют: $U_1 = U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \cdot \sin \Theta$, $U_2 = U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_2) \cdot \cos \Theta$, где φ_1 и φ_2 – фазовые сдвиги сигналов несущей частоты, вызванные их задержкой в цепях СКВТ или сельсина и трансформатора Скотта.

Минимаксная стратегия единого информационного обеспечения мехатроники отразилась в структуре новой отечественной микросхемы RDS-M (рис. 7). Она предусматривает возможность использования в качестве первичного преобразователя сельсина, подключаемого через фильтры нижних частот ФНЧ, масштабирующие усилители МУ и преобразователь координат к модулю Следящего преобразователя угол-код №1, микросхемы RDS-M. Такой подход позволяет упростить модернизацию аппаратуры промышленной автоматики с бесконтактными сельсинами высокой надежности.

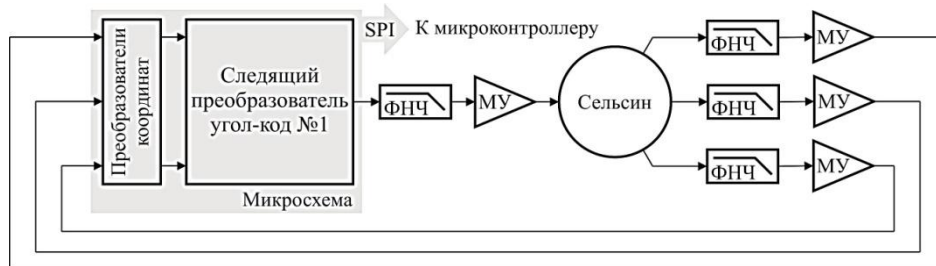


Рис. 7. Схема подключения сельсина к микросхеме RDS-M

Прогресс в сфере RDC обусловлен совершенствованием технологических процессов и разработкой новых схемотехнических решений. Создание интегральных приборов, работающих с высокими скоростью и разрешающей способностью, дает ряд преимуществ, среди которых уменьшение стоимости изделий и расширение их функциональных возможностей [22].

В плане импортозамещения RDC следует отметить выдающиеся достижения отечественных специалистов, разработавших двухканальный вариант цифровой микросхемы, сопоставительные характеристики которой представлены в таблице.

Таблица

Сравнение характеристик микросхемы RDS-M с лучшими аналогами, производимыми компаниями США: DDC, Analog Devices, AeroFlex [29]

Параметр	RDS-M	RD-19230	AD2S1210	ACT5028
Питание, В	Однополярное, 3,0...5,5	Двухполярное, ± 5	Однополярное, 4,75...5,25	Однополярное, 4,5...5,5
Ток потребления, мА	40	25	35	20
Опорная частота, Гц	0...30000	0...10000	3000...20000	45...30000
Максимальная скорость вращения, об/мин	5000	1152	3125	1024
Максимальная точность, бит	16	16	16	16
Полоса пропускания сигнала, Гц	25...6400	300...1200	125...6500	2...7500
Способ реализации алгоритма	Цифровой	Аналоговый	Цифровой	Аналоговый

Заключение. Повышение эффективности преобразователей УПК и RDC при применении в МС связано с совершенствованием структурного, алгоритмического и информационного обеспечения процесса конвертации выходных сигналов СКВТ или резольвера в эквиваленты перемещения с целью формирования рекомендуемых для большинства технологических процессов временных диаграмм составляющих перемещения [21, 22].

В разомкнутом и замкнутом вариантах преобразователей величины перемещения достаточно просто повысить разрешение преобразователя УПК переходом на октантную оцифровку, обеспечивающую формирование 3-х дополнительных старших по весу разрядов кода.

В разомкнутом варианте младшие по весу разряды кода целесообразно формировать АЦПОН сегментов ортогональных составляющих внутри октанта. Арктангенсная конвертация, полученного в результате деления кода тангенса угла, позволяет получить значение кода угла. В замкнутом варианте преобразователя в контуре обратной связи целесообразно использовать тангенсно-котангенсное преобразование [18], а в полифункциональном – синусно-косинусное [17].

Единое информационное обеспечение мехатроники формирует энергоинформатику МС, осуществляющей преобразование энергии в функциональное движение рабочего механизма. Соответствующий уровень информационного обеспечения позволяет с помощью преобразователя УПК или RDC придать энергоинформатике искусственный интеллект, адаптацию, самоорганизацию, оптимизацию по времени и инвариантность к воздействию внутренних и внешних возмущений. Мультифункциональные варианты конвертеров, формирующие сигналы самокоммутации электромашин позволяет повысить электроэффективность электропривода посредством квазигормонической ШИМ и вариации угла коммутации. Это способствует расширению областей применения прецизионного безредукторного электропривода на основе электромашин с постоянными магнитами из редкоземельных сплавов [21]. Важно отметить, что повышение точностных показателей электромашинных СКВТ и датчиков магнитного поля достигается путем калибровки с помощью оптических энкодеров абсолютного типа, имеющих более высокие точностные и динамические показатели [6].

Выбор оптимального типа преобразователя для конкретного применения – трудная задача, усложняемая рядом противоречивых ограничений. Последние определяются возможностями, достоинствами и недостатками циклических и следящих преобразователей УПК и RDC. Мехатронный подход позволяет предложить компромиссный самоорганизующийся вариант с переменной структурой, обладающий расширенными функциональными возможностями и преимуществами исходных типов конвертеров [17].

С точки зрения мехатроники наибольший интерес представляют построение амплитудных следящих преобразователей, позволяющих сформировать единое информационное обеспечение от СКВТ или резольвера. В мультикомпонентных УПК помимо цифрового эквивалента перемещения формируются аналоговые или цифровые эквиваленты его скорости и ускорения подвижной части СКВТ. В мультифункциональном варианте УПК к ним добавляются «автофазированные» составляющие [6] для самокоммутации вентильной машины [19]. В части тахометрии эти требования частично реализуются в микросхемах RDC компании AD (США) [27]. Отсутствие формирования в них составляющей ускорения не позволяет повысить метрологические показатели канала тахометрирования путем придания конвертору свойство самоорганизации. При деликатном профильном управлении отсутствие достоверной информации об ускорении препятствует применению рывка и приданию МС инвариантности, гарантирующей высокое качество функционирования при воздействии внутренних и внешних возмущений высокой интенсивности [6, 7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Smirnov Y.S., Safronov V.V., Anisimov Y.O.* Common Dateware Mechatronic with Resolver-to-Digital Convertor // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2015, Procedia Engineering 129. – 2015. – P. 736-742.
2. *Kenjo T. and Sugawara A.* Stepping motors and their microprocessor control, 2nd edition, Oxford University Press. – 1994. – 248 p.
3. *Cronacher G.* Design, performance and application of the Vernier resolver // The Bell System Technical journal. – 1957. – Issue XXXVI, Vol. 6. – P. 103-112.

4. Мясников В.А., Зверев А.Е., Максимов В.П. Преобразователи угловых перемещений в цифровой код. – Л.: Энергия, 1974. – 203 с.
5. Balkovoi A. and Kallenbach E. A low cost RDC // Proc. of the 49th International Scientific Colloquium, Technical University of Ilmenau. – 2004. – P. 338-342.
6. Балковой А.П., Цаценкин В.К. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. – М.: ИД МЭИ, 2010. – 328 с.
7. Drury B. The Control Techniques Drives and Controls: Handbook, 2nd Edition, EMERSON. JET. – 2009. – 724 p.
8. Sylvan J. New options for Resolver-to-Digital conversion// Machine Design, October 22. – 1987. – P. 141-146.
9. Tomasek J. Structural and performance fundamentals of sinewave-controlled brushless servo drives // Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1989. APEC'89. Conference Proceedings 1989., Fourth Annual IEEE. – 1989. – P. 173-182.
10. RDC 5028C. 16-Bit Monolithic Tracking Rad Tolerant Resolve-To-Digital Converter. 2014. URL: <http://www.aeroflex.com/RDC> (дата обращения: 10.03.2016).
11. Ануфриев В., Лужбинин А., Шумилин С. Методы обработки сигналов индуктивных датчиков линейных и угловых перемещений // Современная электроника. – 2014. – №4. – С. 30-33.
12. Основы обработки данных. Вычисление элементарных функций. <http://bobyeh.ru/referat/69/16419/1.html> (дата обращения: 10.03.2016).
13. Проектирование алгоритма вычисления элементарной функции с использованием таблично-алгоритмического метода: <http://knowledge.allbest.ru/programming/c2c0b65635b2ad78a5c53a88521306c26.html> (дата обращения: 10.03.2016).
14. Сафронов В.В. Способ выделения пачек прямоугольных импульсов из непрерывной последовательности произвольным асинхронным строб-сигналом // Компоненты и технологии. – 2014. – № 9. – С. 128-131.
15. Goodenought F. JCs dictate motor shaft position, velocity and acceleration // Electronic Design. – 188. – Vol. 36, No. 3. – P. 52-53.
16. Woolvet G.A. Transducers in Digital Systems. London, Peter Peregrines Publ. – 1977. – P. 247.
17. Домрачев В.Г., Матвеевский В.Р., Смирнов Ю.С. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 392 с.
18. Домрачев В.Г., Смирнов Ю.С. Цифроаналоговые системы позиционирования. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
19. Smirnov Y.S. Common Dateware of Robotics Mechatronic Converters Proc. of the Third ISMCR'93, Italy, Torino. – 1993. – As 1. – P. 13-18.
20. Смирнов Ю.С., Юрасова Е.В., Функ Т.А. Полифункциональный фазовый преобразователь перемещения // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г. – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. – С. 7171-7182.
21. Смирнов Ю.С. Электромехатронные преобразователи / Под ред. А.Л. Шестакова. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. – 361 с.
22. Smirnov Y.S., Yurasova E.V., Funk T.A. Energoinformatics of a gearless mechatronic systems// International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2015. Procedia Engineering 129. – 2015. – P. 992-996.
23. Smirnov Yu.S., Yurasova E.V., Tsytovich L.I., Funk T.A. A mechatronic data component // Russian Electrical Engineering, Springer Publ. – 2015. – Vol. 86, No. 12. – P. 686-688.
24. RDC 19220/2/4 Series. 16-Bit Monolithic Tracking Resolver (LVDT)-to-Converter. Date Device Corporation: <http://www.ddc-web.com/Products/101/Default.aspx> (дата обращения: 10.03.2016).
25. AD2S1210. Variable Resolution. 10-Bit to 16-Bit R/D Converter with Reference Oscillator. Rev 2. Analog Devices: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/AD2S1210.pdf> (дата обращения: 10.03.2016).
26. Szymczak J., O'Meara Sh., Gealon J. and De La Rama C. Precision Resolver-to-Digital Converter Measures Angular Position and Velocity // Analog Dialogue 48-03. – 2014. – March. – P. 1-6.
27. Сафронов В.В. Теория и практика применения датчиков угла поворота на основе СКВТ // Компоненты и технологии. – 2014. – № 4. – С. 26-30.

28. Прокофьев Г., Стахин В., Обеднин А. К138НХ045 – микросхема преобразователя фазы квадратурного сигнала в код положения // Современная электроника. – 2014. – № 6. – С. 2-4.
29. Ануфриев В., Лужбинин А., Шумилин С. Микросхема преобразователя угол–код для индуктивных датчиков // Современная электроника. – 2015. – № 3. – С. 2-5.
30. Наука. Величайшие теории: Вып. 1: Пространство – это вопрос времени. Эйнштейн. Теория относительности. – М.: De Agostini. – 2015. – 176 p.
31. Энергоинформатика. Большая энциклопедия: в 62-х т. Т. 60. – М.: ТЕПРА, 2006. – 440 с.

REFERENCES

1. Smirnov Y.S., Safronov V.V., Anisimov Y.O. Common Dateware Mechatronic with Resolver-to-Digital Convertor, *International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2015, Procedia Engineering 129*, 2015 pp. 736-742.
2. Kenjo T. and Sugawara A. Stepping motors and their microprocessor control, 2nd edition, Oxford University Press, 1994, 248 p.
3. Cronacher G. Design, performance and application of the Vernier resolver, *The Bell System Technical journal*, 1957, Issue XXXVI, Vol. 6, pp. 103-112.
4. Myasnikov V.A., Zverev A.E., Maksimov V.P. Preobrazovateli uglovykh peremeshcheniy v tsifrovoy kod [Angular displacement transducers in digital code]. Leningrad: Energiya, 1974, 203 p.
5. Balkovoi A. and Kallenbach E. A low cost RDC, *Proc. of the 49th International Scientific Colloquium, Technical University of Ilmenau*, 2004, pp. 338-342.
6. Balkovoi A.P., Tsatsenkin V.K. Pretsizionnyy elektroprivod s ventil'nymi dvigatelyami [Precision Drive with the Brushless Motor]. Moscow: ID MEI, 2010, 328 p.
7. Drury B. The Control Techniques Drives and Controls: Handbook, 2nd Edition, EMERSON. JET, 2009, 724 p.
8. Sylvan J. New options for Resolver-to-Digital conversion, *Machine Design*, October 22. 1987, pp. 141-146.
9. Tomasek J. Structural and performance fundamentals of sinewave-controlled brushless servo drives, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1989. APEC'89. Conference Proceedings 1989., Fourth Annual IEEE*, 1989, pp. 173-182.
10. RDC 5028C. 16-Bit Monolithic Tracking Rad Tolerant Resolve-To-Digital Converter. 2014. Available at: <http://www.aeroflex.com/RDC> (accessed: 10 March 2016).
11. Anufriev V., Luzhbinin A., Shumilin S. Metody obrabotki signalov induktivnykh datchikov lineynykh i uglovykh peremeshcheniy [Signal processing techniques of inductive sensors of the linear and angular displacement], *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2014, No. 4, pp. 30-33.
12. Osnovy obrabotki dannykh. Vychislenie elementarnykh funktsiy [The basics of the data processing. Calculation of elementary functions. Available at: <http://bobyeh.ru/referat/69/16419/1.html> (accessed: 10 March 2016).
13. Proektirovanie algoritma vychisleniya elementarnoy funktsii s ispol'zovaniem tablitsno-algoritmicheskogo metoda [Design of the calculation algorithm of elementary functions using a table-algorithmic method]. Available at: <http://knowledge.allbest.ru/programming/c2c0b65635b2ad78a5c53a88521306c26.html> (accessed: 10 March 2016).
14. Safronov V.V. Sposob vydeleniya pachek pryamougol'nykh impul'sov iz nepreryvnoy posledovatel'nosti proizvol'nym asinkhronnym strob-signalom [Way to select packs of rectangular pulses of arbitrary contiguous asynchronous gate-signal], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2014, No. 9, pp. 128-131.
15. Goodenought F. ICs dictate motor shaft position, velocity and acceleration, *Electronic Design*, 1988, Vol. 36, No. 3, pp. 52-53.
16. Woolvet G.A. Transducers in Digital Systems. London, Peter Peregrines Publ., 1977, pp. 247.
17. Domrachev V.G., Matveevskiy V.R., Smirnov Yu.S. Skhemotekhnika tsifrovyykh preobrazovateley peremeshcheniy [Circuitry digital converters movements]. Moscow: Energoatomizdat, 1987, 392 p.
18. Domrachev V.G., Smirnov Yu.S. Tsifroanalogovyye sistemy pozitsionirovaniya [Digital to analog positioning systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 240 p.
19. Smirnov Y.S. Common Dateware of Robotics Mechatronic Converters Proc. of the Third ISMCR'93, Italy, Torino, 1993, As 1, pp. 13-18.

20. Smirnov Yu.S., Yurasova E.V., Funk T.A. Polifunktional'nyy fazovyy preobrazovatel' peremeshcheniya [Polyfunctional Phase Displacement Transducer], *XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014. Moskva, 16-19 iyunya 2014 g.* [XII all-Russian conference on control problems the EVERYTHING-2014. Moscow, 16-19 June 2014]. Moscow: IPU im. V.A. Trapeznikova RAN, 2014, pp. 7171-7182.
21. Smirnov Yu.S. Elektromekhatronnye preobrazovateli [Electromechanics Converters], Ed. by A.L. Shestakova. Chelyabinsk: Izdat. tsentr YuUrGU, 2013, 361 p.
22. Smirnov Y.S., Yurasova E.V., Funk T.A. Energoinformatics of a gearless mechatronic systems, *International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2015. Procedia Engineering 129*, 2015, pp. 992-996.
23. Smirnov Yu.S., Yurasova E.V., Tsytoich L.I., Funk T.A. A mechatronic data component, *Russian Electrical Engineering, Springer Publ.*, 2015, Vol. 86, No. 12, pp. 686-688.
24. RDC 19220/2/4 Series. 16-Bit Monolithic Tracking Resolver (LVDT)-to-Converter. Date Device Corporation. Available at: <http://www.ddc-web.com/Products/101/Default.aspx> (дата обращения: 10.03.2016).
25. AD2S1210. Variable Resolution. 10-Bit to 16-Bit R/D Converter with Reference Oscillator. Rev 2. Analog Devices: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD2S1210.pdf> (accessed: 10 March 2016).
26. Szymczak J., O'Meara Sh., Gealon J. and De La Rama C. Precision Resolver-to-Digital Converter Measures Angular Position and Velocity, *Analog Dialogue 48-03*, 2014 March, pp. 1-6.
27. Safronov V.V. Teoriya i praktika primeneniya datchikov ugla povorota na osnove SKVT [Theory and practice of angle sensor based on SCRT], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2014, No. 4, pp. 26-30.
28. Prokofev G., Stakhin V., Obednin A. K138NKh045 – mikroskhema preobrazovatelya fazy kvadratnogo signala v kod polozeniya [K138HX045 – phase converter chip for quadrature signal code provisions], *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2014, No. 6, pp. 2-4.
29. Anufriev V., Lushbinin A., Shumilin S. Mikroskhema preobrazovatelya ugol-kod dlya induktivnykh datchikov [Angle-code converter chip for inductive sensors], *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2015, No. 3, pp. 2-5.
30. Nauka. Velichayshie teorii: Vyp. 1: Prostranstvo – eto vopros vremeni. Eynshteyn. Teoriya otноситel'nosti [Science. The great theory: Issue 1: The space - it's a matter of time. Einstein. Theory of relativity]. Moscow: De Agostini, 2015, 176 p.
31. Energoinformatika. Bol'shaya entsiklopediya [Energoinformatic. Grand Encyclopaedia]: in 62 vol. Vol. 60. Moscow: TERRA, 2006, 440 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Бледных.

Смирнов Юрий Сергеевич – Южно-Уральский государственный университет (НИУ); e-mail: smirnovys@susu.ru; 454080, г. Челябинск, пр. им. Ленина, 76; тел.: +79049481048; кафедра приборостроения; д.т.н.; профессор.

Юрасова Екатерина Валерьевна – e-mail: iurasovaev@susu.ru; тел.: +73512679001; кафедра информационно-измерительной техники; к.т.н.; доцент.

Макеева Анастасия Сергеевна – e-mail: makeevaas@susu.ru; тел.: +73512679012; кафедра приборостроения; студент.

Smirnov Yury Sergeevich – South Ural State University (national research university); e-mail: smirnovys@susu.ru; 76, Lenin prospekt, Chelyabinsk, 454080, Russia; phone: +79049481048; the department of instrument making; dr. of eng. sc.; professor.

Yurasova Ekaterina Valerievna – e-mail: iurasovaev@susu.ru; phone: +73512679001; the department of information and measuring equipment; cand. of eng. sc.; associate professor.

Makeeva Anastasiya Sergeevna – e-mail: makeevaas@susu.ru; phone: +73512679012; the department of instrument making; student.