

УДК 681.2.08

Сравнительный анализ моделей энкодеров и резольверов

Назаров. И.А., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Робототехнические системы и мехатроника»*

Пискарев Д.М., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Робототехнические системы и мехатроника»*

*Научный руководитель: Романова И. К., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
кафедра «Робототехнические системы и мехатроника»
marti2003@yandex.ru*

1. Введение

В 60-ых годах формирование робототехники, как науки о технических устройствах, способных работать самостоятельно и заменять человека, а также стремительное развития цифровой вычислительной техники привело к постепенному вытеснению аналоговых систем управления, и постепенной замене их на импульсные. Эта тенденция продолжалось и в 80-ых годах при появлении термина «мехатроника», который по определению предполагал внедрение уже цифровых систем в систему управления. Сейчас мехатронная и цифровая системы стали синонимами. К робототехническим и мехатронным системам, рассматривая их как технические, экономические и автоматические системы, предъявляются всё более жесткие требования, что приводит к внедрению новых аппаратных средств, способных напрямую сочетаться с цифровыми устройствами управления. Такими устройствами в частности являются датчики обратной связи.

Датчик – это устройство, обеспечивающее функциональное преобразование одной величины в другую величину, участвующую в некотором информационном процессе. Датчики углового и линейного перемещений всегда составляли основу информационного обеспечения робототехнических и мехатронных систем.

Датчики обратной связи предназначены для контроля измеряемых координат объекта регулирования и выдачи соответствующей информации в блок памяти или в сравнивающее устройство системы управления. Тип датчиков обратной связи определяется видом используемой в них системы управления.

Исходя из видов систем управления, датчики обратной связи можно разделить на две основные категории: *аналоговые* и *цифровые*, при этом, как правило, обеспечивается абсолютный отсчет перемещений [1].

В качестве датчиков аналогового типа одним из наиболее распространённых являются вращающиеся трансформаторы (ВТ) или *резольверы*, а импульсного типа – *энкодеры*.

2. Принцип работы резольвера

Резольвер – это четырехобмоточная двух- или более полюсная электрическая машина с индукционным взаимодействием роторных и статорных обмоток, предназначенная для преобразования механического перемещения угла поворота ротора в электрический сигнал – выходное напряжение, амплитуда которого зависит от угла поворота.

В зависимости от выходного сигнала различают следующие типы резольверов [1]:

- синусно – косинусные (СКВТ);
- линейные (ЛВТ);
- резольверы – построители;
- фазовращатели (ФВ);
- масштабные ВТ (МВТ).

Примечание:

Важно, что для получения резольверов различных типов можно использовать одну и ту же машину с двумя обмотками на статоре и двумя на роторе при различных способах их включения.

Конструктивно резольвер выполнен подобно асинхронному двигателю с фазным ротором, который, как и статор, представляет собой многополюсный сердечник из листов электротехнической стали или пермаллоя. В пазах ротора и статора проложены по две распределенных обмотки, сдвинутые на 90° одна относительно другой. Обмотки статора имеют одинаковое число витков и активные сопротивления, так же как и обмотки ротора. Концы статорных обмоток непосредственно выведены на разъем, а роторные – с помощью четырех токосъёмных колец ротора и щеток.

На рис. 1 обмотки C_1 , C_2 и C_3 , C_4 называются главной и квадратурной обмотками статора, а P_1 , P_2 и P_3 , P_4 – синусной и косинусной обмотками ротора.

Рассмотрим схему подключения резольвера для случая, когда он может служить датчиков угла поворота объекта управления (рис. 2).

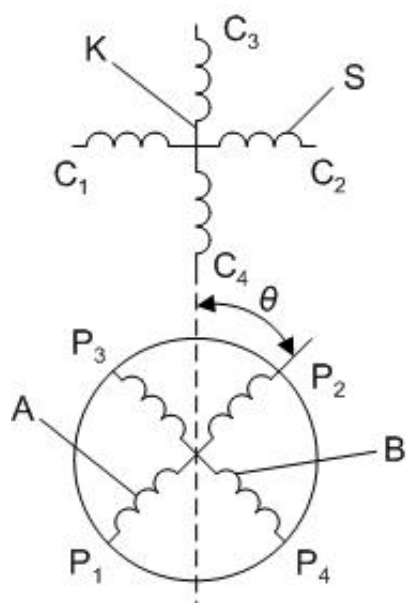


Рис. 1. Обмотки резольвера

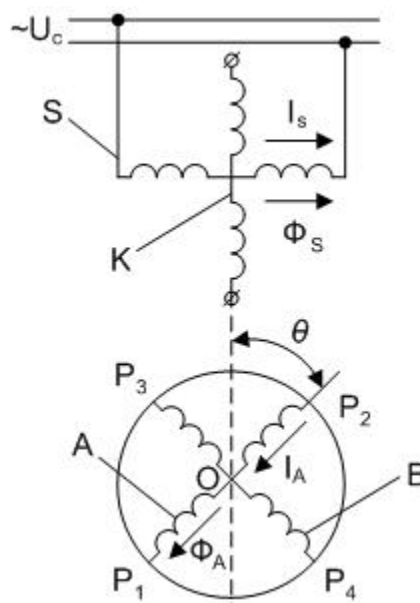


Рис. 2. Схема подключения резольвера, как датчика угла

В данной ситуации обмотки статора и ротора сдвинуты на угол θ друг относительно друга. Поворот ротора вращающегося трансформатора осуществляется редукторным механизмом высокой точности, механически связанным с объектом регулирования. Квадратурную обмотку K замыкают накоротко или на сопротивление.

Если пренебречь активными потерями в обмотках A и S , то выходной сигнал с обмотки A , U_A , будет равняться:

$$U_A = U_c k_T \sin \theta \quad (1)$$

Так как роторная обмотка B сдвинута относительно обмотки A на 90° , то выходной сигнал с обмотки B , U_B , будет равняться:

$$U_B = U_c k_T \cos \theta \quad (2)$$

Таким образом, с учетом уравнений (1) и (2) работа резольвера, как датчика угла, описывается системой (3):

$$\begin{cases} U_A = U_c k_T \sin \theta \\ U_B = U_c k_T \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

где U_A , U_B – напряжение на обмотке A и B соответственно;

U_c – напряжение сети;

k_T – коэффициент трансформации;

θ – угол поворота ротора.

Рассмотрим схему подключения резольвера для случая, когда он может служить датчиком линейного перемещения объекта управления.

Для получения максимально линейной выходной характеристик резольвера применяют две схемы подключения: с первичным и вторичным симметрированием. Схема первичного симметрирования представлена на рис. 3.

В данной схеме квадратурную обмотку K замыкают накоротко, а обмотку возбуждения S соединяют последовательно с косинусной обмоткой B , а их концы подключают к сети. К синусной обмотке A подсоединяют нагрузочное сопротивление Z_{HA} .

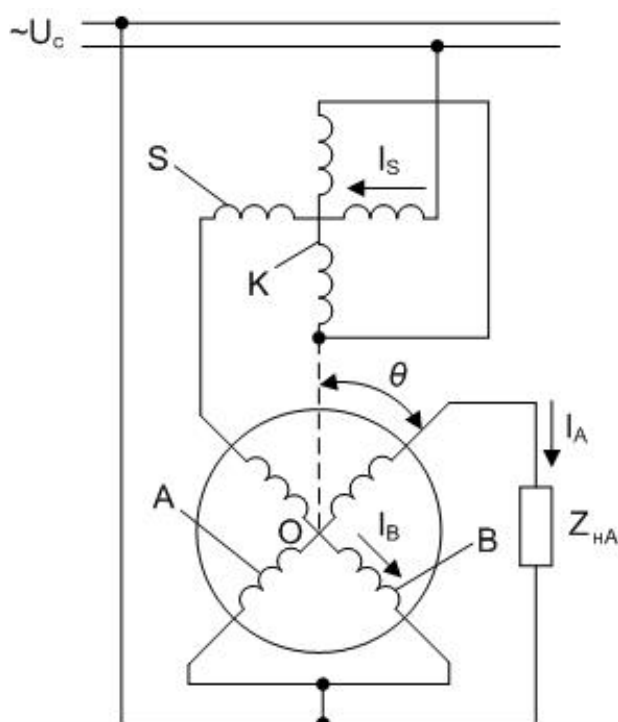


Рис. 3. Схема первичного симметрирования

Пренебрегая активными потерями в обмотках S и B можно записать:

$$U_c \approx E_S + E_B \quad (4)$$

Следовательно, с учетом (4), пренебрегая активными потерями в обмотке A , получаем формулу (5) работы энкодера, как датчика линейного перемещения:

$$U_A = \frac{k_T U_c \sin \theta}{1 + k_T \cos \theta} \quad (5)$$

Данная формула позволяет считать выходную характеристику линейной в пределах изменения угла ротора $\theta = \pm 55^\circ$ и при коэффициенте трансформации $k_T = 0,52 \dots 0,56$.

3. Модельный ряд ведущих производителей резольверов.

Необходимыми параметрами для выбора резольвера являются [2]:

- Число пар полюсов, p_p ;
- Напряжение питания, $U_{пит}$ (U_c), В;
- Выходной ток, $I_{вых}$, мА;
- Фазовый сдвиг, $\Delta\varphi$, °;
- Коэффициент трансформации k_T ;
- Нагрузка на роторе: радиальная, F_r , и осевая, F_t , Н;
- Частота вращения вала, $n_{об}$, об/мин;

Компаниями – производителями резольверов являются такие фирмы, как *Baumer*, *Moog Components Group*, *Electric Sensors*, *MTC Industries*, *TYCO Electronics*.

Модельный ряд резольверов от производителей *Baumer* [3] и *Moog Components Group* [4] приведен в таблице 1.

Таблица 1

«Модельный ряд резольверов производителей *Moog comp. Group* и *Baumer*»

Производитель	Модель	Технические характеристики					
		p_p	$U_{пит}$, В	$I_{вых}$, мА	$\Delta\varphi$, °	k_T	$n_{об}$, об/мин
<i>Baumer</i>	<i>KTD4-1 A</i>	4	10	100	13.5	0,454	6000
	<i>KTD4-6 A</i>	4	60	80	58	0,454	3000
<i>Moog Components Group</i>	<i>11-BHW-27</i>	2	6	9,1	0.5	0,5	4000
	<i>11-BHW-32</i>	2	21	13,2	18	1,75	6000
	<i>11-BHW-37</i>	2	6	16.3	-4,6	0,5	4000
	<i>SSH-12-A-1</i>	4	5	7,3	20	0,4	3000
	<i>SSJH-98-A-1</i>	4	26	71	30	0,45	16000
	<i>SSJH-63-A-1</i>	4	26	80	30	0,454	16000

Примечание:

Полную информацию и данные о других возможных производителях синусно-косинусных, линейных резольверов, а также инкрементальных и абсолютных энкодеров вы можете найти на сайте [5] в разделе «Products and suppliers → Sensors , transducers and detectors → Encoders and resolvers».

4. Принцип работы энкодера

Энкодер - это датчик преобразующий линейное или угловое перемещение объекта управления в последовательность импульсов - *инкрементальный энкодер* (энкодер относительного перемещения), или в двоичный код - *абсолютный энкодер* (рис. 4).

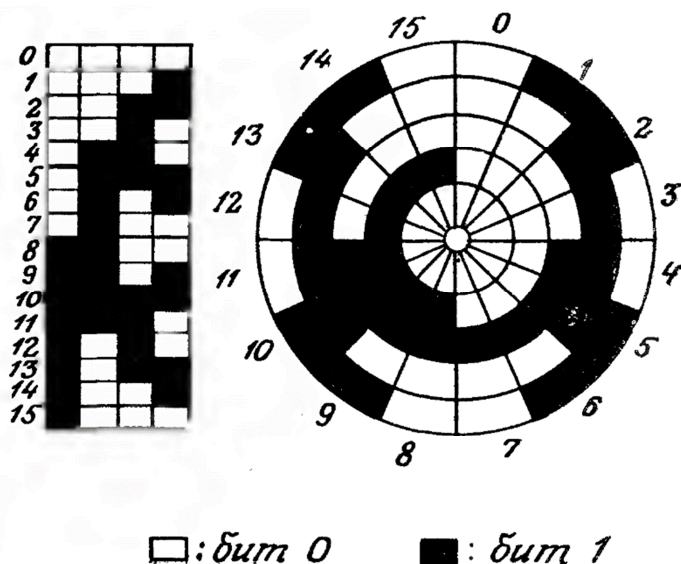


Рис. 4. Абсолютный энкодер

Конструктивно *абсолютный энкодер* представляет собой рейку для линейных перемещений или диск для угловых перемещений, разделенные на N равных площадок (полос в случае рейки, секторов в случае диска). Главное отличие его от инкрементального состоит в том, что положению вала соответствует свой уникальный двоичный код. Таким образом, абсолютный энкодер обладает свойством запоминания положения объекта управления.

Каждый сектор или полоска – это бинарный код из n бит. Число площадок определяет разрешение следующим образом: $L/2^n$ для рейки длиной L или $360^\circ/2^n$ для диска.

Каждый бит в площадке можно трактоваться как логическую «1» или «0» по разному:

- ненамагничиваемая или проводящая поверхность (магнитное считывание);
- изолирующая или проводящая поверхность (электрическое считывание);
- непрозрачная или просвечивающая поверхность (оптическое считывание).

В настоящее время оптическое считывание применяется наиболее часто. Для каждой дорожки или сектора имеется светодиод и приемник – фототранзистор. В определенном положении светодиодами засвечиваются те или иные фототранзисторы. По комбинации открытых транзисторов можно определить положение объекта управления.

Кодирование положения объекта регулирования осуществляется тремя наиболее распространенными способами [1].

- *Прямой код.* Следующее положение объекта управления определяется прибавлением одного бита к коду предыдущего положения. Но такой метод обладает крупным недостатком. Бывает очень неудобно выражать изменение числа на одну единицу одновременным изменением многих бит. Например,

$$15_{10} = 01111_2, 16_{10} = 10000_2$$

Увеличивается вероятность одновременного считывания битов и, как следствие, возрастания вероятности ошибки, когда считывание происходит на границе двух значений.

- *Код Грея.* Реализуется он по следующему правилу: текущий разряд кода Грея, G_i получается путем сложения по модулю два ($mod2$) соответствующего, B_i , и следующего, B_{i+1} разрядов двоичного кода. При таком кодировании соседние коды будут отличаться лишь на один бит, но также данный метод требует дополнительной обратной перекодировки в прямой двоичный код. Соотношения двоичных чисел в различных кодах приведены в таблице 2.

Таблица 2

«Перевод десятичных чисел из двоичного кода в код Грея»

Десятичный код	Двоичный код	Код Грея
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
6	0101	0111
6	0110	0101
8	0111	0100

- *Носители кодов с управляемым считыванием.* В этом случае используют прямой двоичный код, но есть дополнительная дорожка, которая генерирует двоичный сигнал: либо разрешение считывания, либо отправка команды запомнить прочитанное и воспретить всякое новое считывание в зонах перехода.

Конструктивно *инкрементальный энкодер* тоже представляет собой диск или рейку, с двумя или тремя концентрическими или параллельными дорожками, каждая из которых разделена на n равных элементарных площадок. Считывающее устройство размещается вдоль оси, перпендикулярной перемещению рейки, или вдоль радиуса круга. Считывание информации об угле или перемещении объекта управления осуществляется по тому же принципу, что и в абсолютных энкодерах, например, при помощи светодиодов, засвечивающих дорожку, и фототранзистора.

Иногда добавляют третью дорожку с единственной прозрачной элементарной площадкой, для установки начального положения.

Инкрементальные энкодеры используются в тех случаях, когда сохранение абсолютного углового положения объекта управления при выключении питания не требуется. Например, для контроля скорости вращения. Инкрементальный энкодер необходим для подсчитывания импульсов за фиксированный промежуток времени, на основе которых можно определить скорость и положение объекта управления.

Направление перемещения диска инкрементального энкодера определяется на основе сигналов S_1 , S_2 , S_3 снятых с дорожек A , B и $INDEX$ (рис. 5).

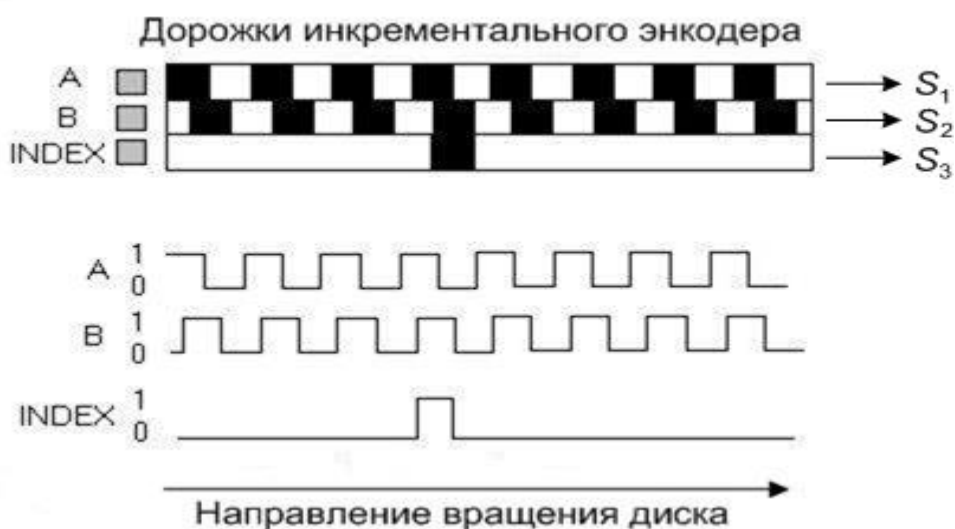


Рис. 5. Определение направления вращения инкрементального энкодера

Электронные схемы обработки сигналов с инкрементального энкодера позволяют, исходя из производной $\frac{dS_1}{dt}$ сигнала S_1 дорожки A , распознать передний или задний фронты и связать их с состоянием сигнала S_2 : логической «1» или «0» в тот же момент времени.

5. Модельный ряд ведущих производителей энкодеров.

При выборе энкодера следует обратить внимание на следующие параметры [2]:

- Число импульсов на оборот, N (число бит у абсолютных энкодеров). От данного показателя зависит точность системы — чем больше импульсов, тем выше точность;
- Выходной ток, $I_{\text{вых}}$, мА;
- Тип выходного сигнала энкодера (HTL , TTL , $RS422$, двоичный код, код Грея, и др.). Данный параметр влияет на снятие сигнала энкодера и дальнейшую его передачу;
- Напряжение питания, $U_{\text{пит}}$ (U_c), В;
- Частота вращения вала, $n_{\text{об}}$, об/мин;

К основным производителям инкрементальных и абсолютных энкодеров можно отнести следующие фирмы: *Lika*, *SICK*, *Electromate*, *Baumer*, *B&PLUS USA*, *Digi-Key Corporation*, *Grayhill*, *Computer Optical Products*, *TRM International*.

Модельные ряды энкодеров производителей *Lika* [6-8], *Sick* [9-11], *Netzer* [12] и *B&PLUS USA* [13-14] приведены в таблице 3.

Таблица 3

«Модельный ряд энкодеров производителей *Lika*, *Sick*, *Netzer* и *B&PLUS USA*»

Производитель	Модель	Технические характеристики				
		N	$U_{\text{пит,}}$ В	$I_{\text{вых,}}$ мА	Тип выходного сигнала	$n_{\text{об,}}$ об/мин
<i>Lika</i>	<i>IM30</i>	2048	5	10	<i>TTL/ RS 422</i>	4000
	<i>IM31</i>	2048	5	10	<i>TTL</i>	6000
	<i>C58</i>	2048-3600	30	40	<i>TTL</i>	6000
	<i>C101</i>	1024-2048	5	70	<i>TTL/ RS 422</i>	6000
<i>SICK</i>	<i>ARS20</i>	2..32768	10-30 DC	10	<i>SSi, Profibus</i>	6000/ 10000
	<i>ATM90</i>	1..8192	10-32 DC	10	Код Грея	6000
	<i>AFM90</i>	26244	10-32 DC	10	<i>SSI</i>	9000
<i>Netzer</i>	<i>DS-25</i>	16	5 DC	< 10	<i>SSI</i>	3000
	<i>DM-130</i>	64	5 DC	< 10	<i>SSI</i>	750
<i>B&PLUS USA</i>	<i>MAS-10-256G</i>	256	5 DC	70	Код Грея	6000
	<i>MAH-20-2048G</i>	2048	5 DC	100	Код Грея	6000

6. Сравнительный анализ

Следует отметить важность габаритно масштабных характеристик. В силу своих конструктивных особенностей энкодеры, например, серии 26-GS фирмы *Grayhill* имеют встроенную плату интерфейса, что значительно сокращает размеры прибора.

Большинство резольверов, например, серии *Moog JSSB-15-J* имеют внешнюю систему электронного управления – плату. С одной стороны – это значительное увеличение размеров, с другой – расширение функциональных возможностей датчика.

Экономические особенности. При цифровой системе управления энкодер не требует внешней аппаратуры, но к резольверам, как уже отмечалось выше, возможно применение дополнительные схемы обработки выходных сигналов (микросхем).

Модернизация энкодеров будет продолжаться в связи с усовершенствованием цифровой техники. Что касается аналоговой техники, то она применяется и по сей день, но с каждым годом объем производства заметно сокращается главным образом из-за возрастающих издержек и вытеснением с рынка более совершенными цифровыми приборами. Таким образом, падает рентабельность производства резольверов.

Технические и технологические особенности. Энергопотребление цифрового датчика при тех же массогабаритных характеристиках меньше, так как в энкодере применяются низковольтные полупроводниковые приборы (светодиоды, фототранзисторы).

За счет того, что реальный резольвер имеет множества потерь мощности: потери в стали, потоки рассеивания в зазоре между статором и ротором, активные потери в обмотках – всё это делает его менее эффективным, чем энкодер.

С технологической точки зрения изготовление резольверов заметно сложнее, так как изготовление обмоток, листов электротехнической стали для магнитопровода, соблюдение допусков в зазоре между статором и ротором требует более качественной оснастки и продуманного технологического процесса.

С другой стороны, резольвер имеет явное преимущество по части эксплуатационных характеристик. Резольвер выдерживает большие нагрузки, включая вибрационное воздействие, и обладает более широким диапазоном рабочих температур.

Особенности с точки зрения систем автоматического управления. Энкодер безусловно обладает большей точностью, так как она в основном определяется разрядностью диска и элементной базой энкодера, в отличие от резольвера, где точность определяется технологическим процессом его изготовления.

7. Заключение

В результате изложенных принципов работы резольверов и энкодеров был проведен общетехнический сравнительный анализ данных датчиков с различных точек зрения на мехатронные и робототехнические системы. Также были приведены различные модели резольверов и энкодеров современных производителей и их технические показатели, дающие количественное представление об основных параметрах современных датчиков положения.

Анализ показал, что при всё большем внедрении цифровых систем управления на базе цифровых фильтров и компьютерного программирования, а также развития цифровой

электроники в современных робототехнических и мехатронных системах энкодеры имеют больше преимуществ, чем недостатков. Хотя стоит заметить, что резольверы продолжают широко применяться во многих сферах промышленности совместно с соответствующими микросхемами обработки.

Следует отметить, что данная статья разрабатывалась с целью облегчения решения задачи использования резольвера или энкодера при реализации обратной связи в современных мехатронных и робототехнических системах.

Список литературы

1. Воротников С.А. Информационные устройства робототехнических систем / под ред. С.Л. Зенкевича, А.С. Ющенко. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 384 с.
2. Михеев В.П, Просандеев А.В. Датчики и детекторы: учебное пособие. М.: Издательство МИФИ, 2007. 172 с.
3. Baumer Tachogenerators. Available at: [http://pfinder.baumer.com/pfinder_motion/downloads/Produkte/PDF/Datenblatt/Tachogeneratoren/ Baumer_KTD_4_A_4_Y10_DS_EN.pdf](http://pfinder.baumer.com/pfinder_motion/downloads/Produkte/PDF/Datenblatt/Tachogeneratoren/Baumer_KTD_4_A_4_Y10_DS_EN.pdf), accessed 17.03.2015.
4. Motion Technology Catalog. Brushless and Brush Motors, Drive Electronics, Gearheads and Position Sensors. Available at: <http://www.moog.com/literature/MCG/motorcatalog.pdf>, accessed 17.03.2015.
5. IHS Engineering. Available at: <http://www.globalspec.com>, accessed 17.03.2015.
6. Rotapuls. Incremental encoder modules. Series IM30, IM31, IM56. Available at: http://www.lika.it/eng/file7.php?id_file=2728, accessed 18.03.2015.
7. Rotapuls. Incremental encoders. Series C58, C59, C60. Available at: http://www.lika.it/eng/file7.php?id_file=77, accessed 18.03.2015.
8. Rotapuls. Heavy-duty encoder. Series C101. Available at: http://www.lika.it/eng/file7.php?id_file=2090, accessed 18.03.2015.
9. ARS 20, ARS 25. Single-turn Absolute Encoders. Modular Design for tailor-made solutions. Available at: <http://sick.tta.ru/sites/sick.tta.ru/files/File/pdf/DIV07/ARS20-25.pdf>, accessed 18.03.2015.
10. ATM 60/ATM 90. Absolute Encoders Multiturn extremely robust and exceptionally reliable. – Available at: http://sick.tta.ru/sites/sick.tta.ru/files/File/pdf/Div01/atm60_atm90.pdf, accessed 18.03.2015.
11. AFS60: Абсолютный Энкодер Однооборотный, SSI AFM60: Абсолютный Энкодер Многооборотный, SSI. Режим доступа:

http://sick.tta.ru/sites/sick.tta.ru/files/File/pdf/DIV07/AFS60_AFM60.pdf (дата обращения 18.03.2015).

12. Netzer. Precision Motion Sensors Ltd. Available at: https://www.netzerprecision.com%2Ffiles%2FNetzer_brochure_lr.pdf, accessed 18.03.2015.
13. MAS-10 Series: Absolute. Available at: http://www.b-plus-kk.com/PDF/Global/mtl/EN_mas-10_series.pdf, accessed 18.03.2015.
14. MA-20 Series: Absolute. Available at: http://www.b-plus-kk.com/PDF/Global/mtl/EN_MA-20.pdf, accessed 18.03.2015.