

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГОЛ – ПАРАМЕТР – КОД

А.В. Алексеев¹, В.В. Алексеев², Р.И. Князев², Ю.Т. Котов³,
В.М. Полушкин², Ю.П. Батырев³, В.А. Есаков³

¹ОАО «Радиоприборснаб», 141014, Московская обл., г. Мытищи, ул. Трудовая, д. 31, стр. 1

²Филиал ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, 141006, Московская обл., г. Мытищи, ул. Комарова, д. 13, корп. 3

³МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

batyrev@mgul.ac.ru

Приведены результаты исследований по влиянию повышенной температуры окружающей среды и внешнего электромагнитного поля на точностные характеристики и информационную способность преобразователя угол – параметр – код различных типов. Показано, что указанные воздействия являются наиболее критичными для этих преобразователей. Максимальные значения воздействующих факторов уменьшают информационную способность преобразователей в 3–5 раз.

Ключевые слова: преобразователь угол – параметр – код, точность, информационная способность, температура, электромагнитное поле

Ссылка для цитирования: Алексеев А.В., Алексеев В.В., Князев Р.И., Котов Ю.Т., Полушкин В.М., Батырев Ю.П., Есаков В.А. Влияние условий эксплуатации на точностные характеристики преобразователей угол – параметр – код // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2019. Т. 23. № 1. С. 118–124.

DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-118-124

Цифровые преобразователи угол-параметр-код (УПК) предназначены для преобразования информации об угле, скорости в код. Эти преобразователи используются во многих системах автоматического управления и в значительной мере определяют уровень их технических характеристик [1–17]. Основным критерием качества функционирования преобразователей УПК являются их точностные характеристики в реальных условиях эксплуатации. До настоящего времени в технической литературе все сведения о влиянии внешних эксплуатационных факторов на эти характеристики носят неполный характер, что не позволяет сделать выводы о качестве функционирования преобразователей УПК в аппаратуре.

Цель работы

Целью настоящих исследований являлось определение степени влияния повышенной температуры окружающей среды и внешнего электромагнитного поля (ЭМП) на точностные характеристики преобразователей УПК.

Материалы и методы

Для проведения испытаний на воздействие повышенной температуры и внешнего ЭМП на вращающийся трансформатор (ВТ) было разработано специальное устройство [18]. Благодаря ему представилась возможность проведения измерения погрешности координат смены значений кода E_2 преобразователя УПК на всем обороте вала ВТ в 256 угловых координатах, а не в одной угловой координате, как до этого выполнялось

существующим методом [17]. Указанный объем измерений дает возможность с высокой степенью достоверности определять вид закона распределения вероятностей (ЗРВ) погрешности E_2 .

Сущность разработанного подхода заключается в том, что определяется не достоверность кода, регламентированная стандартом [12], а информационная способность преобразователя. В этом случае метод ее определения базируется на знании ЗРВ погрешности преобразования E , состоящей из суммы погрешности квантования E_1 и погрешности E_2 . В начале определяется величина потерь информации ΔH на основе отношения средних квадратических отклонений σ погрешностей идеального (он имеет только погрешность E_1) и реального преобразователя $E_{\text{рн}}$. При этом в среднее квадратическое отклонение реального датчика $\sigma(E_{\text{рн}})$ должно входить среднее значение погрешности, которое реализуется по принципу сложения дисперсий. Величина ΔH вычисляется по формуле $\Delta H = -\log_2(\sigma(E_1) / \sigma(E_{\text{рн}}))$. Затем определяется информационная способность преобразователя, выраженная в битах $m = n - \Delta H$, где n — разрядность преобразователя. Информационная способность в квантах выглядит как $M = 2^m$ [2, 19, 20].

Результаты и обсуждение

Воздействие повышенной температуры окружающей среды при проведении испытаний было направлено либо на аналоговый датчик угла, либо на аналого-цифровой преобразователь сигналов ВТ в код (АЦПВТ), либо на обе эти составные части преобразователя УПК. В испытаниях

Т а б л и ц а 1

Оценка точностных возможностей преобразователей УПК при воздействии на ВТ и АЦПВТ повышенной температуры существующим и разработанным методами

Assessment of the accuracy capabilities of converters of the CPC when exposed to high-voltage and high-temperature converters high temperature by existing and developed methods

Тип ВТ, заводской номер	Тип АЦПВТ, заводской номер	В соответствии с норма- тивной документацией		С использованием математических моделей				
		$d(E_2)$, угл.с	$d_1(E_2) / d(E_2)$	$d_1(E_2) / d(E_2)$	M / M_T	$\delta_{ухудш}$	Δm , бит	ΔM , квант/°С
2,5БВТ 09800044	ПФК-12 005	2468	1,11	1,93	3,43	1,78	0,83	13,5
2,5БВТ 09800044	CSR-2401 +M5000	2048	1,33	1,70	2,32	1,36	0,44	3,9
2,5ВТ 116178	ПВК-10 002	1440	2,06	1,58	3,29	2,08	1,06	6,0
2,5ВТ 116178	ПВК-10* 002	1440	1,21	1,25	1,43	1,14	0,19	7,2
2,5ВТ 116178	ПВК-10** 002	1440	2,00	2,07	4,49	2,17	1,12	6,5
2,5ВТ 116009	RDC-1704 8203297	333	1,23	1,15	1,44	1,25	0,53	8,7

Примечание. * — ВТ в нормальных условиях ($T = 20$ °С), ПВК-10 при $T = 50$ °С; ** — ВТ при $T = 85$ °С, ПВК-10 при $T = 50$ °С; в остальных случаях ВТ при $T = 100$ °С; величины, полученные при воздействии повышенной температуры, обозначены индексом «Т».

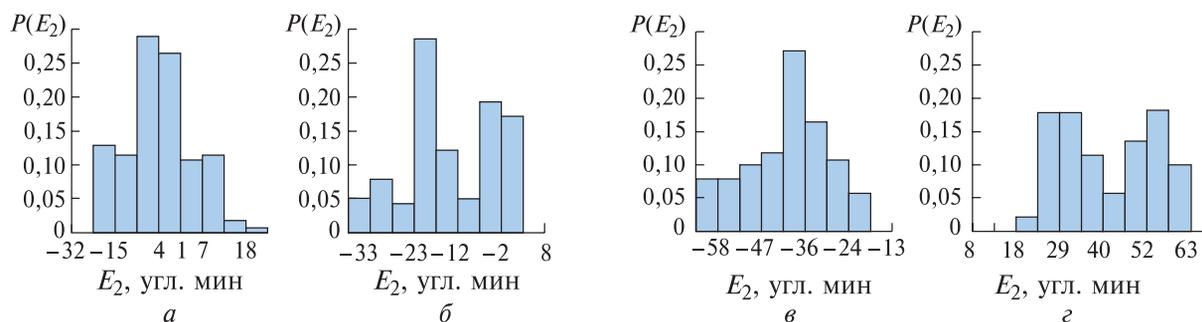


Рис. 1. Распределение вероятностей погрешности E_2 преобразователей УПК, составленных из ВТ типа 2,5БВТ (а-г) и АЦПВТ типов CSR-2401 (а, б) и ПФК-12 (в, г)

Fig. 1. The probability distribution of the error of the E_2 converters of the CPC, composed of VT type 2.5BT (a-g) and ATCVT types CSR-2401 (a, б) and PFC-12 (в, г)

были использованы ВТ типов: 2,5ВТ, 2,5БВТ и БИФ-112. Также для испытаний были выбраны четыре типа отечественных 10-, 12-, 13-разрядных АЦПВТ и два типа зарубежных 10- и 14-разрядных АЦПВТ. В результате у преобразователей УПК отмечено ухудшение всех основных статистических параметров ЗРВ погрешности E_2 . В табл. 1 приведены значения изменений, обусловленных воздействием на ВТ и (или) АЦПВТ повышенной температуры. Из таблицы видно, что ухудшение у всех преобразователей УПК происходило практически по всем параметрам ЗРВ. Информационная способность преобразователя уменьшается при воздействии температуры 45 и 65 °С на АЦПВТ соответственно в 1,24 и 1,6 раза. Воздействие на ВТ температуры

85 и 100 °С приводит к уменьшению информационной способности преобразователя в 1,44 и 3,43 раза. При расчете этих изменений на 1 °С можно сделать вывод, что для исследованных преобразователей УПК воздействие повышенной температуры на ВТ или АЦПВТ приводит приблизительно к равному изменению информационной способности преобразователя. При воздействии одновременно на ВТ температуры 85 °С и на АЦПВТ -50 °С информационная способность преобразователя уменьшается в худшем случае в 4,5 раза.

На рис. 1 представлены ЗРВ статистического вида погрешности E_2 преобразователей УПК при нормальных условиях и при воздействии повышенной температуры окружающей среды.

Т а б л и ц а 2

**Интегральная оценка точности преобразователей УПК
в процессе воздействия ЭМП на ВТ и АЦПВТ**

**Integral assessment of the accuracy of the converters of the CPC
in the process of exposure to EMF on VT and ATCVT**

Тип ВТ, заводской номер	Тип АЦПВТ, заводской номер	Вид ЭМП; H , А/м	Нормальные условия		ЭМП				
			$d(E_2)$, угл.с	M , квант	$d(E_2)^*$, угл.с	$M_{\text{ЭМП}}$, квант	$M / M_{\text{ЭМП}}$	Δm , бит	ΔM , квант / А/м
2,5ВТ 116009	RDC-1704 8203297	Пост.; 500	333	3984	381	2746	1,45	0,54	2,5
2,5ВТ 116009	RDC-1704 8203297	Пер., 50 Гц; 940	333	3984	426	832	4,79	2,26	3,3
2,5ВТ 116009	RDC-1704 8203297	Пер., 00 Гц; 557	333	3984	632	1746	2,28	1,19	4,0
2,5БВТ 09800044	CSR-2401 +M5000	Пер., 400 Гц; 350	2048	431	2411	182	2,37	1,24	5,3

Примечание. $d(E_2)^*$ — диапазон ЗРВ погрешности E_2 преобразователя УПК в процессе воздействия ЭМП; Δm — уменьшение информационной способности преобразователя УПК в процессе воздействия ЭМП. Преобразователи УПК на основе RDC-1704 — 14-разрядные, на основе CSR-2401 — 10-разрядные.

Из рис. 1 видно, что воздействие температуры вызывает большое смещение ЗРВ, превышающее по величине диапазон закона. Смещение наблюдается в сторону как увеличения, так и уменьшения угла, т. е. погрешности либо положительные, либо отрицательные. Вид закона имеет тенденцию к ухудшению: наблюдается увеличение несимметричности, двухмодальности. Следовательно, при измерении погрешности E_2 преобразователя при воздействии температуры имеет место изменение вида ЗРВ и его параметров. Что влечет в дальнейшем к существенному уменьшению информационной способности преобразователя УПК.

Для сравнения оценка точности ВТ в условиях повышенной температуры существующим методом (по нормативной документации) дает увеличение погрешности в лучшем случае в 1,13 раза (против 1,24 при оценке разработанным методом) и в худшем случае в 2,27 раза (против 4,25). Таким образом, действительные значения ухудшения точностных возможностей преобразователя УПК отличаются от оценки их по нормативной документации в 1,07–2,17 раза.

В ходе проводимых испытаний воздействию ЭМП подвергались только ВТ. Это обусловлено тем, что эти изделия более критичны к этому фактору. В качестве испытуемых аналоговых датчиков угла были взяты ВТ типов 2,5ВТ и 2,5БВТ, а в качестве АЦПВТ — зарубежные 14- и 10-разрядные преобразователи сигналов ВТ в код типов RDC-1704 и CSR-2401, выпускаемые фирмами Memory Devices Inc. и Astrosystems (США).

Точностные характеристики УПК при воздействии ЭМП, вид ЗРВ, а также изменение

оценки математического ожидания ведут себя аналогично точностным характеристикам ВТ при воздействии на него такого же ЭМП. Это является естественным, так как поле в обоих случаях действовало только на ВТ. Однако в преобразователе возросло негативное влияние помех, возникающих в выходных сигналах ВТ от воздействия ЭМП. Это влияние оказалось настолько большим, что при воздействии переменного ЭМП напряженностью $H = 557$ А/м = 7 Э и частотой $f = 400$ Гц (той же частоты, с какой был запитан ВТ) два младших разряда 14-разрядного преобразователя не идентифицировались. Логические «0» и «1» «шумели». То есть действие ЭМП заметно проявилось во всем тракте преобразований аналогового сигнала ВТ в код. Поэтому параметры ЗРВ погрешности преобразователя УПК изменились в большей степени, чем у ВТ.

Основной вклад в изменение информационной способности преобразователя УПК оказывает смещение всех угловых координат в одну сторону, что приводит к появлению большой систематической погрешности. Погрешность преобразователя, возникающая от воздействия ЭМП, носит обратимый характер: после снятия воздействия параметры преобразователя возвращаются к тому уровню, который был до воздействия.

В табл. 2 приведены результаты интегральной оценки точности преобразователей УПК в процессе воздействия ЭМП.

Из табл. 2 видно, что воздействие постоянного ЭМП вызывает существенно меньшие изменения точностных и информационных характеристик, чем переменного. Воздействие перемен-

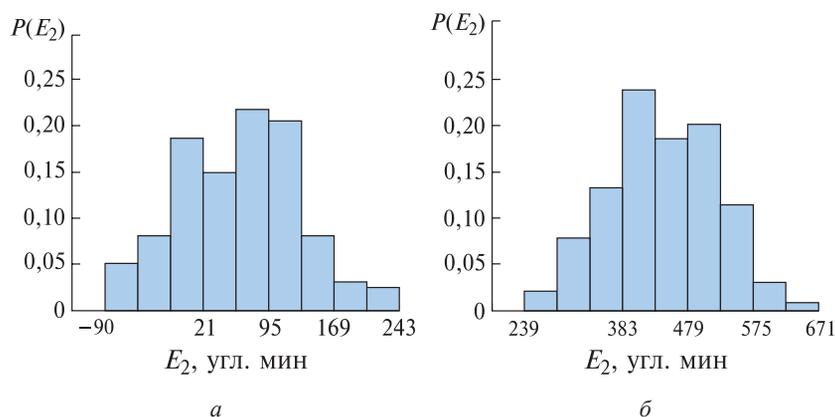


Рис. 2. Распределение вероятностей погрешности E_2 преобразователя УПК, составленного из ВТ типа 2,5ВТ и АЦПВТ типа RDC-1704, в нормальных условиях (а) и при воздействии на ВТ переменного ЭМП частотой 50 Гц и напряженностью 940 А/м (б)

Fig. 2. The probability distribution of the error E_2 of the converter of the CPC, made up of VT type 2.5W and ATCVT type RDC-1704, under normal conditions (a) and when a variable EMF frequency of 50 Hz and a voltage of 940 A/m (b) is applied to the VT

ного ЭМП частотой 400 Гц и напряженностью 350 А/м (4,4 Э) приводит к уменьшению информационной способности преобразователя УПК в 1,75–2,37 раза в зависимости от типа преобразователя. ЭМП напряженностью 557 А/м (7 Э) приводит к уменьшению информационной способности преобразователя в 2,3 раза. Переменные ЭМП частотой 50 Гц и напряженностью 940 А/м (11,8 Э) характеризуются достаточно жестким воздействием, что приводит к понижению информационной способности преобразователя в 4,8 раза.

На рис. 2 представлены ЗРВ погрешности E_2 преобразователя УПК при воздействии на ВТ внешнего ЭМП. В принципе воздействие ЭМП приводит к аналогичным изменениям ЗРВ погрешности E_2 и его параметрам, как и при воздействии температуры. Некоторые отличия заключаются в том, что вид ЗРВ изменяется меньше, а смещение среднего значения больше. Это обусловлено тем, что воздействие температуры вызывает небольшие деформации активных частей ВТ — статора и ротора, но они являются источником значимого увеличения погрешности ВТ и, как следствие, погрешности преобразователя УПК. При воздействии же ЭМП на ВТ этих деформаций не возникает.

Из изложенного можно сделать вывод, что ЭМП является достаточно критичным фактором, сравнимым по степени влияния на точность преобразователя с температурными воздействиями. Например, при воздействии на ВТ требуемого уровня температуры 85–100 °С имеется равный эффект влияния на информационную способность преобразователя УПК, как и при воздействии на ВТ уровней по-

стоянного ЭМП напряженностью 477 А/м (6 Э) или переменного ЭМП напряженностью 318 А/м (4 Э), уровень которых определяется, как правило, условиями эксплуатации в аппаратуре.

Выводы

1. В ходе проведенных исследований разработан метод контроля и оценки точностных и информационных характеристик преобразователей УПК при воздействии на них внешних факторов — повышенной температуры и внешнего ЭМП.

2. Установлено, что информационная способность преобразователей УПК при воздействии температуры на ВТ уменьшилась в 3,43 раза, при воздействии на АЦПВТ — в 1,6 раза, а при воздействии на обе составные части одновременно — в 4,5 раза. Это свидетельствует о большой критичности воздействия повышенной температуры окружающей среды на функциональные характеристики различных преобразователей УПК. Рекомендуется избегать воздействия повышенной температуры окружающей среды при эксплуатации данного типа УПК.

3. Воздействие ЭМП на ВТ вызывает существенное изменение параметров ЗРВ погрешности преобразователя. Информационная способность преобразователя при воздействии на ВТ переменного ЭМП частотой 400 Гц и напряженностью 557 А/м (7 Э) уменьшилась в 2,3 раза, а с частотой 50 Гц и напряженностью 940 А/м (11,8 Э) — в 4,8 раза. Таким образом, ЭМП является достаточно критичным фактором, сравнимым по степени влияния на точность преобразователя с температурными воздействиями.

Список литературы

- [1] Домрачев В.Г., Мейко Б.С. Цифровые преобразователи угла. М.: Энергоатомиздат, 1984. 328 с.
- [2] Алексеев А.В., Алексеев В.В., Князев Р.И., Полушкин В.М. Информационная оценка точности цифровых преобразователей угла // Военная электроника и электротехника. Научно-технический сборник. М.: ФГБУ «46ЦНИИ» Минобороны России, 2015. Вып. 67(Ф). С. 138–146.
- [3] Ануфриев В., Лужбинин А., Шумилин С. Методы обработки сигналов индуктивных датчиков линейных и угловых перемещений // Современная электроника, 2014. № 4. С. 30–33.
- [4] Смирнов Ю.С., Юрасова Е.В., Вставская Е.В., Никитин И.С. Специфика применения синусно-косинусных сенсоров // Материалы VII Российской конференции «Информационные технологии в управлении» (ИТУ-2014). Санкт-Петербург, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 07–09 октября 2014 г. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 720–729.
- [5] Сафронов В.В. Теория и практика применения датчиков угла поворота на основе СКВТ // Компоненты и технологии, 2014. № 4. С. 26–30.
- [6] Смирнов Ю.С., Юрасова Е.В., Козина Т.А. Полифункциональный фазовый преобразователь перемещения // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 16–19 июня 2014 г. М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 7171–7182.
- [7] Болгов И.С., Дементьев Ю.Н. Прецизионный преобразователь с функцией формирования кода скорости вращения в совокупности с индукционным датчиком угла // Фундаментальные исследования, 2016. № 7–1. С. 9–13.
- [8] Мясников В.А., Зверев А.Е., Максимов В.П. Преобразователи угловых перемещений в цифровой код. Л.: Энергия, 1974. 203 с.
- [9] Пахоменков Ю.М. Диагностика трансформаторных датчиков угла с применением контрольных функций // Системы управления и обработки информации, 2015. № 31. С. 135–142.
- [10] Домрачев В.Г., Матвеевский В.Р., Смирнов Ю.С. Схемотехника цифровых преобразователей перемещений. М.: Энергоатомиздат, 1987. 392 с.
- [11] Смирнов Ю.С. Электромехатронные преобразователи / под ред. А.Л. Шестакова. Челябинск: ЮУрГУ, 2013. 361 с.
- [12] ГОСТ РВ 52015–2003. Преобразователи угла цифровые. Общие технические условия. Введ. 2003-05-02. М.: Госстандарт России. Изд-во стандартов, 2003. 53 с.
- [13] Домрачев В.М., Сигачев И.П. Цифровой преобразователь угла. Патент на изобретение РФ № 2365032 от 20.08.2009 г. Бюл. 23.
- [14] Шляндин В.М. Цифровые измерительные преобразователи и приборы. М.: Высшая школа, 1973. 280 с.
- [15] Ахметжанов А.А. Системы передачи угла повышенной точности. М.–Л.: Энергия, 1966. 272 с.
- [16] Аникст Д.А., Константинович К.М., Меськин И.В. Высокоточные угловые измерения / под ред. Ю.Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
- [17] ГОСТ РВ 51816–2001. Трансформаторы вращающиеся. Групповые технические условия. Дополнение к государственному военному стандарту Российской Федерации. М.: Стандартиформ, 2005. 4 с.
- [18] Алексеев В.В., Горбанев В.А., Рыжков А.А. Устройство для измерения погрешностей вращающегося трансформатора. Авторское св-во СССР № 1005245, МКИ H03K24/00. / заявлено 18.09.81 г. Опубликовано 15.03.83 г. Бюл. № 10.
- [19] Сафронов В.В. Способ измерения угла поворота вала привода и устройство для его реализации. Патент РФ № 2580153, G01B7/30 / заявитель ФГУП «ЦНИИмаш». Опубл. 10.04.2016 г. Бюл. № 10.
- [20] Агапов М.Ю. Аттестация высокоразрядных датчиков угла // Материалы докладов V Конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». Санкт-Петербург, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 15 марта–30 ноября 2011 г. / под общ. ред. В.Г. Пешехонова. СПб.: ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2004. С. 173.

Сведения об авторах

Алексеев Александр Валерьевич — начальник отдела ОАО «Радиоприборснаб», hit-el@mail.ru

Алексеев Валерий Васильевич — старший научный сотрудник филиала ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, hit-el@mail.ru

Князев Роман Игоревич — старший научный сотрудник филиала ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, hit-el@mail.ru

Котов Юрий Терентьевич — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kotov46@inbox.ru

Полушкин Вячеслав Михайлович — заместитель начальника отдела, начальник лаборатории филиала ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, hit-el@mail.ru

Батырев Юрий Павлович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), batyrev@mgul.ac.ru

Есаков Виталий Анатольевич — канд. техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), esakov@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 09.09.2018.

Принята к публикации 26.11.2018.

INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON THE ACCURACY CHARACTERISTICS ANGLE – PARAMETER – CODE CONVERTERS

A.V. Alekseev¹, V.V. Alekseev², R.I. Knyazev², T.Yu. Kotov³, V.M. Polushkin²,
Yu.P. Batyrev³, V.A. Esakov³

¹Radiopriborsnab, 31, buil. 1, Trudovaya st., 141014, Mytishchi, Moscow reg., Russia

²Branch of the FGBI 46 the «Central research Institute» of the Ministry of defense of Russia, 13, buil. 3, Komarova st., 141006, Mytishchi, Moscow reg., Russia

³BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

batyrev@mgul.ac.ru

The results of studies effect of elevated ambient temperature and the external electromagnetic field on the accuracy characteristics and information capacity angle – parameter – code converter of various types are presented. It is shown that these effects are the most critical for these converters. The maximum values of the influencing factors reduce information capacity of converters by 3–5 times.

Keywords: angle – parameter – code converter, accuracy, information ability, temperature, electromagnetic field

Suggested citation: Alekseev A.V., Alekseev V.V., Knyazev R.I., Kotov Yu.T., Polushkin V.M., Batyrev Yu.P., Esakov V.A. *Vliyaniye usloviy ekspluatatsii na tochnostnyye kharakteristiki preobrazovatelye ugol – parametr – kod* [Influence of operating conditions on the accuracy characteristics angle – parameter – code converters]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 118–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-1-118-124

References

- [1] Domrachev V.G., Meyko B.S. *Tsifrovyye preobrazovateli ugla* [Digital angle converters]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 328 p.
- [2] Alekseev A.V., Alekseev V.V., Knyazev R.I., Polushkin V.M. *Informatsionnaya otsenka tochnosti tsifrovyykh preobrazovatelye ugla* [Information assessment of the accuracy of digital angle converters] // *Military Electronics and Electrical Engineering. Scientific and technical collection. Iss. 67(F)*. Moscow: «46TsNII» Minoborony Rossii [«46CNII» of the Ministry of Defense of Russia], 2015, pp. 138–146.
- [3] Anufriev V., Luzhbinin A., Shumilin S. *Metody obrabotki signalov induktivnykh datchikov lineynykh i uglovykh peremeshcheniy* [Methods of signal processing of inductive sensors of linear and angular displacements] // *Sovremennaya elektronika* [Modern Electronics], 2014, no. 4, pp. 30–33.
- [4] Smirnov Yu.S., Yurasova E.V., Vstavskaya E.V., Nikitin I.S. *Spetsifika primeneniya sinusno-kosinusnykh sensorov* [Specific use of sine-cosine sensors] // *Materialy VII Rossiyskoy konferentsii «Informatsionnyye tekhnologii v upravlenii» (ITU-2014)* [Proceedings of the 7th Russian Conference «Information Technologies in Management» (ITU-2014)]. St. Petersburg, Concern Central Research Institute Elektropribor, October 07–09, 2014. St. Petersburg: «Kontsern «TsNII «Elektropribor» [Concern Central Research Institute Elektropribor], 2014, pp. 720–729.
- [5] Safronov V.V. *Teoriya i praktika primeneniya datchikov ugla povorota na osnove SKVT* [Theory and practice of using angle-of-turn sensors based on SCWT] // *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2014, no. 4, pp. 26–30.
- [6] Smirnov Yu.S., Yurasova E.V., Kozina T.A. *Polifunktional'nyy fazovyy preobrazovatel' peremeshcheniya* [Polyfunctional phase displacement transducer] // *XII Vserossiyskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2014*. Moskva, IPU im. V.A. Trapeznikova RAN, 16–19 iyunya 2014 g. [XII All-Russian Meeting on the problems of control of the ASCP-2014. Moscow, IPU them. V.A. Trapeznikova, Russian Academy of Sciences, June 16–19, 2014]. Moscow: IPU im. V.A. Trapeznikova of the Russian Academy of Sciences, 2014, pp. 7171–7182.
- [7] Bolgov I.S., Dement'ev Yu.N. *Pretsizionnyy preobrazovatel' s funktsiyey formirovaniya koda skorosti vrashcheniya v sovkupnosti s induktsionnym datchikom ugla* [Precision transducer with the function of forming the rotation speed code in conjunction with the induction angle sensor] // *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic Research], 2016, no. 7–1, pp. 9–13.
- [8] Myasnikov V.A., Zverev A.E., Maksimov V.P. *Preobrazovateli uglovykh peremeshcheniy v tsifrovoy kod* [Converters of angular movements in a digital code]. Leningrad: Energy, 1974, 203 p.
- [9] Pakhomenkov Yu.M. *Diagnostika transformatornykh datchikov ugla s primeneniem kontrol'nykh funktsiy* [Diagnostics of transformer angle sensors using control functions] // *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii* [Control Systems and Information Processing], 2015, no. 31, pp. 135–142.
- [10] Domrachev V.G., Matveevskiy V.R., Smirnov Yu.S. *Skhemitekhnika tsifrovyykh preobrazovatelye peremeshcheniy* [Circuit design digital motion converters]. Moscow: Energoatomizdat, 1987, 392 p.
- [11] Smirnov Yu.S. *Elektromekhatronnyye preobrazovateli* [Electromechatronic converters] / Ed. A.L. Shestakova. Chelyabinsk: SUSU, 2013, 361 p.
- [12] *GOST RV 52015–2003. Preobrazovateli ugla tsifrovyye. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [GOST RV 52015–2003. Digital angle converters. General technical conditions. Enter 2003-05-02]. Moscow: Gosstandart Rossii. Izd-vo standartov [State Standard of Russia. Standards Publishing House], 2003, 53 p.
- [13] Domrachev V.M., Sigachev I.P. *Tsifrovoy preobrazovatel' ugla* [Digital angle converter]. Pat. Russian Federation, no. 2365032, dated 08.20.2009, bull. 23.
- [14] Shlyandin V.M. *Tsifrovyye izmeritel'nye preobrazovateli i pribory* [Digital measuring transducers and devices]. Moscow: Vysshaya shkola [Higher School], 1973, 280 p.
- [15] Akhmetzhanov A.A. *Sistemy peredachi ugla povyshennoy tochnosti* [High accuracy angle transmission systems]. Moscow–Leningrad: Energiya [Energy], 1966, 272 p.
- [16] Anikst D.A., Konstantinovich K.M., Mes'kin I.V. *Vysokotochnyye uglovyye izmereniya* [High-precision angular measurements] / Ed. Yu.G. Yakushenkov. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 480 p.

- [17] *GOST RV 51816–2001. Transformatory vrashchayushchiesya. Gruppovye tekhnicheskie usloviya. Dopolnenie k gosudarstvennomu voennomu standartu Rossiyskoy Federatsii* [GOST RV 51816–2001. Rotary transformers. Group technical conditions. Addition to the state military standard of the Russian Federation]. Moscow: Standardinform, 2005, 4 p.
- [18] Alekseev V.V. Gorbanev V.A., Ryzhkov A.A.. *Ustroystvo dlya izmereniya pogreshnostey vrashchayushchegosya transformatora* [A device for measuring the errors of a rotating transformer]. Copyright St. USSR in the number 1005245, MKI NC 03/24, declared 18.09.81, publ. 03.15.83, bull. no. 10.
- [19] Safronov V.V. *Sposob izmereniya ugla povorota vala privoda i ustroystvo dlya ego realizatsii* [The method of measuring the angle of rotation of the drive shaft and device for its implementation]. Pat. Russian Federation, no. 2580153, G01B7/30, applicant «TsNIIImash», publ. 04.10.2016, bull. no. 10.
- [20] Agapov M.Yu. *Attestatsiya vysokorazryadnykh datchikov ugla* [Certification of High-Angle Angle Sensors]. Materialy dokladov V Konferentsii molodykh uchenykh «Navigatsiya i upravlenie dvizheniem». Sankt-Peterburg, «Kontsern «TsNII «Elektropribor», 15 marta – 30 noyabrya 2011 g. [Navigation and Motion Control Proceedings of the reports of the 5th Young Scientists Conference, St. Petersburg, Concern Central Research Institute Elektropribor, March 15 – November 30, 2011] / Ed. V.G. Peshekhonov. St. Petersburg: «Kontsern TsNII «Elektropribor» [Concern Central Research Institute Elektropribor], 2004, p. 173.

Authors' information

Alekseev Aleksandr Valerievich — Chief department of the «Radiopriborsnab», hit-el@mail.ru

Alekseev Valery Vasilievich — Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher, branch «46CNII» Ministry of Defence, hit-el@mail.ru

Knyazev Roman Igorevich — Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher, branch «46CNII» Ministry of Defence, hit-el@mail.ru

Kotov Yuriy Terentievich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), kotov46@inbox.ru

Polushkin Vyacheslav Mihailovich — Cand. Sci. (Tech.), Chief laboratory, branch «46CNII» Ministry of Defence, hit-el@mail.ru

Batyrev Yuriy Pavlovich — Cand. Sci. (Tech.), Associated Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), batyrev@mgul.ac.ru

Esakov Vitaliy Anatolievich — Cand. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), esakov@mgul.ac.ru

Received 09.09.2018.

Accepted for publication 26.11.2018.