

*С. В. Кисляков*

## ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

*S. V. Kislyakov*

## PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC PHASE TURNS IN INFORMATION AND MEASURING SYSTEM

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Объектом исследования является фазовый датчик линейных перемещений, преобразующий вращающий момент в угловое перемещение. Предметом исследования является система для измерения угловых перемещений, позволяющая увеличить чувствительность датчиков. Целью работы является изменение электрических параметров фазовращателей в зависимости от измеряемых линейных или угловых перемещений. **Материалы и методы.** Для измерения угловых перемещений на валу разработана структурная схема системы, позволяющей на порядок увеличить чувствительность датчиков угловых перемещений. **Результаты.** Представлены результаты экспериментального исследования электромагнитных фазовращателей. Приведены некоторые соотношения для датчиков угловых перемещений с электромагнитной редукицией. **Выводы.** Решена задача разработки информационно-измерительной системы с повышенной точностью и быстродействием. Из полученных результатов следует, что использование принципа локального взаимодействия обмоток расширяет возможности применения бегущих магнитных полей.

**A b s t r a c t. Background.** The object of the study is a phase linear displacement transducer that converts the torque into angular displacement. The subject of study is a system for measuring angular displacements, which allows to increase the sensitivity of sensors. The aim of the work is to change the electrical parameters of phase shifters depending on the measured linear or angular displacements. **Materials and methods.** To measure the angular displacements on the shaft, a structural scheme of the system has been developed, which allows an increase in the sensitivity of the angular displacement sensors by an order of magnitude. **Results.** The results of an experimental study of electromagnetic phase shifters are presented. Some relationships for angular displacement sensors with electromagnetic reduction are given. **Conclusions.** Solved the problem of developing an information-measuring system, with increased accuracy and speed. From the obtained results it follows that the use of the principle of local interaction of the windings expands the possibilities of using traveling magnetic fields.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** угловое перемещение, датчик, информационно-измерительная система, фазовращатель.

**Key words:** angular displacement, sensor, information-measuring system, phase shifter.

### *Введение*

Теория электромагнитных измерительных фазовращателей проработана достаточно глубоко [1]. Соответствие параметров и характеристик реальных фазовращателей теоретическим положениям зависит от того, насколько точно теоретические выкладки учитывают особенности конструкции измерительных фазовращателей и качество изготовления их элементов.

Ранее рассмотрена зависимость погрешности фазовращателей от частоты питающего генератора, от стабильности выходных напряжений двухфазного генератора и их фазового

сдвига, от изменения электрических параметров фазовращателей при изменении положения магнитного шунта на информационной линейке, от других параметров [2].

Особый интерес для разработчиков измерительных систем представляют параметры фазовращателей с электромагнитной редуцией, позволяющие на порядок увеличить чувствительность датчиков угловых перемещений [3].

Разработка информационно-измерительных систем механических величин не потеряла своей актуальности до настоящего времени.

### Частотные характеристики фазовращателей

Для исследований частотных характеристик параметров выбран фазовый датчик линейных перемещений с длиной информационной линейки 160 мм и длиной магнитного шунта 20 мм. Исследуемый фазовращатель имеет статорный магнитопровод из электротехнической стали, при этом рабочие части обмоток и торцевые части равномерной обмотки подняты над магнитопроводом на 1,5 мм с целью ослабления взаимной связи обмоток при отсутствии магнитного шунта. Пассивные стороны синусной и косинусной обмоток находятся непосредственно в пазах магнитопровода глубиной 6 мм. На рис. 1 представлены экспериментальные зависимости активных и реактивных сопротивлений равномерной, синусной и косинусной обмоток.

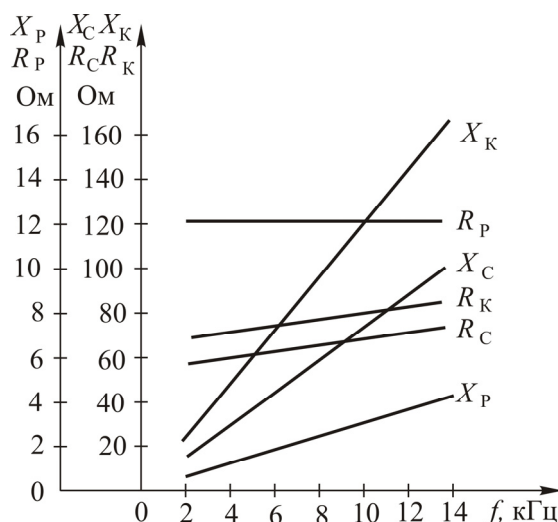


Рис. 1. Экспериментальные зависимости сопротивлений обмоток

На рисунке масштабы частотных характеристик равномерной обмотки ( $R_p$  и  $X_p$ ) в десять раз больше, чем масштаб других характеристик. Из экспериментальных характеристик следует то, что эквивалентное сопротивление равномерной обмотки  $R_p \approx 12$  Ом практически не зависит от частоты, что указывает на то, что магнитопровод линейки практически не оказывает влияния на равномерную обмотку. Реактивное сопротивление обмотки  $X_p$  практически линейно и ее продолжение проходит через начало координат, указывая на пренебрежительно малое влияние межвитковых емкостей.

Количество витков синусной и косинусной обмоток в среднем было больше, чем равномерной, и индуктивные сопротивления синусной  $X_c$  и косинусной  $X_k$  обмоток изменялись практически по линейному закону в диапазоне изменения частот от 2 до 14 кГц.

Из графиков следует то, что индуктивность косинусной обмотки значительно больше индуктивности синусной. Это обусловлено тем, что косинусная обмотка в первом и последнем пазу информационной линейки имеет достаточно много дополнительных пассивных проводников.

Частотные характеристики активных сопротивлений синусной и косинусной обмотки не совпадают. Их угол наклона к оси частот несколько отличается. Это объясняется тем, что обмотки имеют различное эквивалентное количество пассивных проводников, находящихся в

пазах. Линейность частотных характеристик  $R_K(f)$  и  $R_C(f)$  указывает на то, что потери в сердечнике информационной линейки обусловлены лишь перемагничиванием сердечника.

Измерение параметров фазовращателя производилось с помощью вольтметра с высоким разрешением, фазометра повышенной точности (5-разрядного) и образцового генератора синусоидальных колебаний. Измерение тока производилось косвенным путем.

В процессе исследований вычислялись взаимные индуктивности синусных и косинусных обмоток при отсутствии магнитного шунта. Коэффициенты взаимной индукции находились в пределах 0,1 мкГн при частоте 6 кГц и уменьшались почти в полтора раза при увеличении частоты до 14 кГц. Рабочее же максимальное значение индуктивностей фазовращателя, как будет показано ниже, составило 120 мкГн, что позволяет говорить о его хороших метрологических характеристиках даже без дополнительной балансировки фазовращателя.

### Электрические параметры фазовращателя

Для исследования характеристик фазовращателей в качестве базового выбран линейный фазовращатель [4]. Это обусловлено тем, что именно в линейном фазовращателе сочетаются все противоречия и проблемы. В случае фазовращателей с угловыми перемещениями синусная и косинусная обмотки абсолютно идентичны [5]. С другой стороны, у угловых фазовращателей нет краевого эффекта. Однако их объединяет единая фазовая теория и единый путь улучшения характеристик [6].

Датчик линейных перемещений или линейный фазовращатель, частотные характеристики параметров которого представлены в предыдущем разделе, был подвержен испытанию в рабочем режиме, т.е. изменялось положение магнитного шунта и производились измерения индуктивностей и взаимных индуктивностей обмоток. Испытуемый датчик не подвергался дополнительной балансировке после изготовления [7]. Диапазон измеряемых перемещений датчика составил 150 мм при длине информационной линейки фазовращателя 180 мм.

На рис. 2 представлены графики зависимости реактивных сопротивлений равномерной  $X_p$ , синусной  $X_c$  и косинусной  $X_k$  обмоток в той же зависимости от положения шунта на статоре датчика. Графиками подтверждается синусоидальная зависимость реактивных сопротивлений равномерной, синусной и косинусной обмотки от положения шунта на информационной линейке. Обе индуктивности обмоток имеют большие постоянные составляющие.

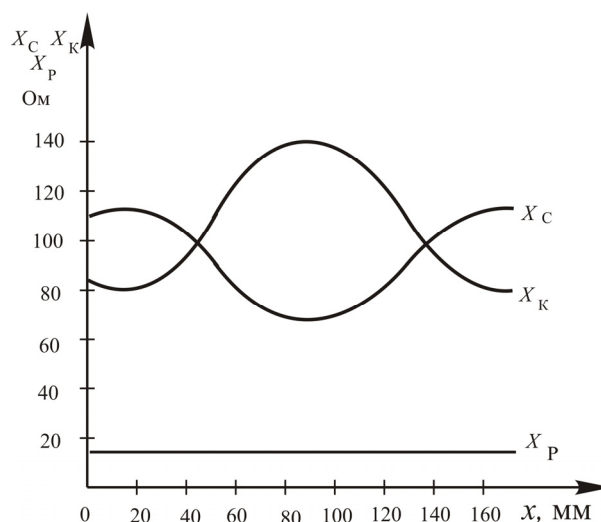


Рис. 2. Зависимость реактивных сопротивлений от положения шунта на статоре датчика

Но постоянная составляющая косинусной обмотки больше составляющей реактивного сопротивления синусной обмотки. Это объясняется наличием большого количества пассивных проводников косинусной обмотки в крайних пазах информационной линейки.

Резистивные сопротивления синусной и косинусной обмоток отличаются друг от друга примерно на 10 Ом. Это обусловлено разностью омических сопротивлений пассивных проводников крайних пазов. При перемещении шунта резистивные сопротивления изменяются.

Это объясняется потерями в магнитопроводе. Изменение сопротивлений составляет 3–5 Ом при среднем значении сопротивления косинусной обмотки  $R_K = 82$  Ом и сопротивлении синусной обмотки  $R_C = 72$  Ом. Изменения сопротивлений незначительные и с учетом того, что, как правило, последовательно в их цепь включаются дополнительные сопротивления, превышающие значения  $R_C$  и  $R_K$  в сотни раз, неравенство сопротивлений синусной и косинусной обмотки и их изменение при перемещении шунта практически не влияют на погрешность измерений.

Из всех характеристик особый интерес представляют изменение взаимных индуктивностей обмоток датчика.

Графики зависимостей  $M_{PC}$ ,  $M_{PK}$ ,  $M_{CK}$  в функции перемещения шунта фазовращателя показаны на рис. 3 и 4.

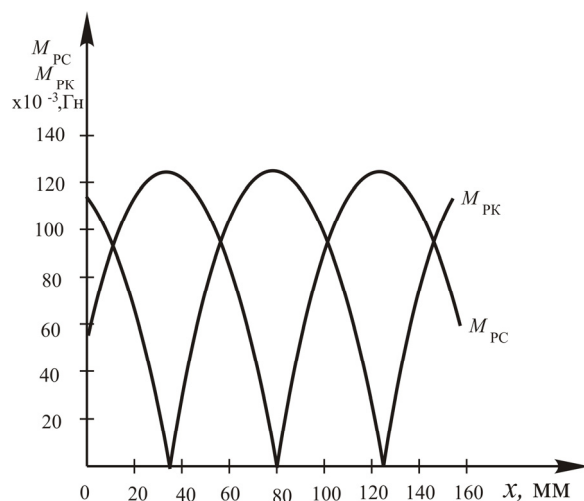


Рис. 3. Изменение взаимных индуктивностей  $M_{PC}$ ,  $M_{PK}$  обмоток датчика

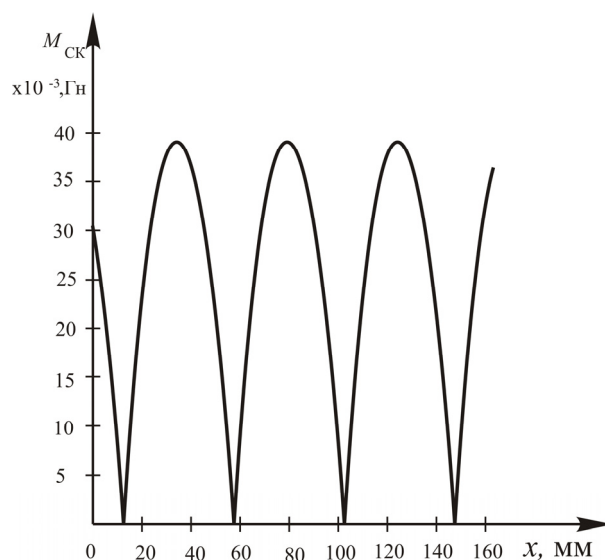


Рис. 4. Изменение взаимной индуктивности  $M_{CK}$  обмотки датчика

Теоретические соотношения, полученные ранее, подтверждаются полностью [8, 9]. «Нули» функции выражены достаточно четко.

Межвитковые емкости и изменение реактивных сопротивлений при перемещении шунта приводят к появлению дополнительных погрешностей. Однако их влияние на погрешность измерений незначительно.

Взаимные индуктивности равномерной и синусной и равномерной и косинусной обмотки составили 123 мГн. Взаимная индуктивность синусной и косинусной обмоток  $M_{CK}$  изменяется

по закону синуса, но с периодом в два раза меньшим периода изменения  $M_{PC}$  и  $M_{PK}$ . Амплитудное максимальное значение составляет 42 мГн и определяется количеством витков обмоток. Реальный диапазон перемещений шунта составил величину несколько большую 150 мм при длине активной части 180 мм. Уменьшение измеряемого диапазона объясняется реальными размерами магнитного шунта, поэтому графики  $M_{PC}$ ,  $M_{PK}$  и  $M_{СК}$  начинаются не с нуля.

#### *Некоторые соотношения для магнитной системы датчика с магнитной редукцией*

При описании конструкции датчика уже рассматривалась особенность магнитной системы датчика с электромагнитной редукцией [10]. Особенность конструкции заключается в том, что ширина паза и ширина зубца магнитного провода статора равны между собой. Ротор такого фазовращателя в общем случае представляет собой цилиндр из ферромагнитного материала. Высота цилиндра равна высоте магнитопровода статора. На роторе по всей окружности имеются зубцы с шириной, равной ширине зубцов статора, но их количество на единицу больше или меньше количества зубцов статора.

Ранее уже говорилось о том, что амплитуды намагничивающих сил зубцов статора одинаковы [11]. Отличие заключается в различных значениях начальных фаз намагничивающих сил. Магнитный поток каждого отдельного зубца пропорционален магнитной проводимости этого зубца, которая в свою очередь пропорциональна площади сечения зубца или площади воздушного зазора.

Если статор имеет  $n$  зубцов, тогда его зубцовое деление  $\tau_1 = \frac{360}{n}$ , а зубцовое деление ротора  $\tau_2 = \frac{360}{n+1}$ . Пусть ширина зубцов статора в пространственных градусах равна  $\frac{360}{n}m$ , где  $m$  – коэффициент равный отношению ширины зубцов в градусах к полюсному делению статора  $\tau_1$ . Будем предполагать, что ширина зубцов ротора равна ширине зубца статора. Очевидно то, что при площади сечения зубца статора  $S_z$  площадь воздушного зазора, или площадь перекрытия зубцов, будет зависеть от взаимного расположения осей зубцов статора и ротора.

Если ось первого зубца статора совпадает с осью зубца ротора, то ось зубца ротора сдвинута относительно оси второго зубца статора на угол  $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$ . Ось третьего зубца статора не совпадает с осью зубца ротора на угол  $2\Delta\tau$  и т.д.

В общем случае для  $k$ -го зубца смещение осей будет составлять угол равный  $\tau \cdot (k-1)$ , этот прямо пропорционально номеру зубца.

Магнитный поток каждого зубца, как уже говорилось ранее, пропорционален площади перекрытия, которая в свою очередь уменьшается с увеличением угла смещения зубцов.

Определим номер последнего зубца  $i$ , у которого площадь перекрытия не будет еще равна нулю. Его можно определить как отношение ширины зубца к углу смещения осей соседних зубцов статора и ротора  $\Delta\tau$

$$\Delta\tau = \frac{360}{n} - \frac{360}{n+1} = 360 \cdot \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} \right) = 360 \cdot \frac{1}{n \cdot (n+1)},$$

если ширина зубца статора  $\frac{360}{n} \cdot m$ , то

$$i = \frac{360 \cdot m}{n \cdot \Delta\tau} = \frac{360 \cdot m \cdot n \cdot (n+1)}{360 \cdot n} = m \cdot (n+1).$$

Искомый номер зубца получают из дробного полученного значения путем отбрасывания дробной части.

Таким образом, величина магнитного потока будет максимальной на первом зубце и будет уменьшаться при увеличении номера зубцов вплоть до зубца с номером  $i = m \cdot (n+1)$ . Аналогичное распределение магнитных потоков будет и у зубцов с номерами  $n$ ,  $(n-1)$ ,  $(n-2)$  и так далее до зубца  $(n-i)$ .

Из графика следует то, что при  $m = 0,5$  магнитные потоки всех  $n$  зубцов практически не равны нулю. Распределение же магнитных потоков по статору линейно в функции угла, определяющего местоположение зубца. Введя понятие удельного магнитного потока, т.е. магнитного потока на единицу пространственного угла, и устремляя  $n$  к бесконечности, получили графики зависимости распределения магнитного потока по статору для различных значений  $m$  (рис. 5).

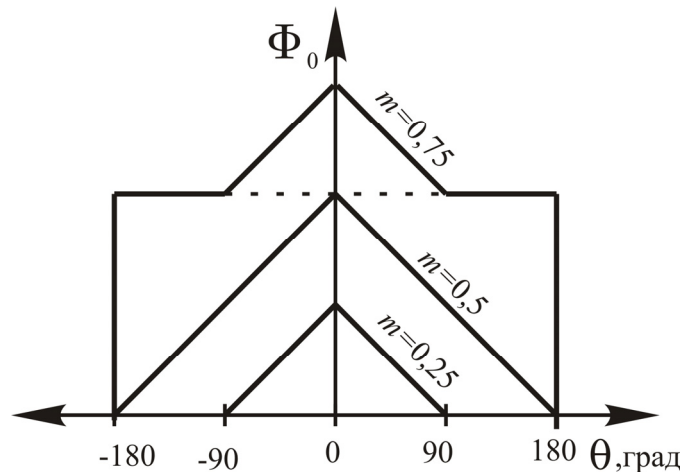


Рис. 5. Зависимость распределения магнитного потока по статору

При  $m = 0,5$  все зубцы статора являются активными и создают магнитные потоки, наводящие в выходной обмотке намагничивающую силу. При уменьшении ширины зубца при сохранении зубцового деления зона активных зубцов уменьшается, и при  $m = 0,25$  только половина зубцов имеет площадь перекрытия зубцов статора и ротора, не равны нулю. Это объясняется тем, что в этом случае при углах статора больших  $\pm 90^\circ$  от точки «совпадения осей» зубцы статора расположены над пазами ротора и теоретически их поток равен нулю. Особый интерес представляет график при  $m = 0,75$ . При такой ширине зубцов активными являются лишь половина зубцов, расположенных в зоне  $\pm 90^\circ$ . Магнитные потоки остальных зубцов не равны нулю, но не стоит забывать о том, что при равенстве магнитных потоков всех зубцов их сумма с учетом фазового сдвига равна нулю.

Из анализа графика следует очевидный вывод о том, что увеличение ширины зубца в редукторном датчике сверх половины зубцового деления не эффективно с точки зрения увеличения выходного напряжения.

Выше было рассмотрено лишь распределение удельного магнитного потока по статору при различных значениях  $m$ . С точки зрения получения максимального напряжения на выходе необходимо учитывать не только абсолютное значение магнитного потока, но и начальную фазу этого магнитного потока.

Уравнение прямой, находящейся справа от оси удельных потоков  $\Phi_0$  при  $m = 0,5$ :

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} \left( 1 - \frac{1}{\pi} \Theta \right),$$

и слева от оси при отрицательных значениях  $\Theta$ :

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} \left( 1 + \frac{1}{\pi} \Theta \right).$$

Уравнение прямой начальных фаз  $\alpha = \Theta$ . С учетом значения  $m$  уравнения магнитных потоков:  $\Phi_0 = m\Phi_{0m} \left( 1 - \frac{1}{2m\pi} \Theta \right)$  и  $\Phi_0 = m\Phi_{0m} \left( 1 + \frac{1}{2m\pi} \Theta \right)$ .

Уравнения действительны при  $\Theta = \pm 2m\pi$ . Выходное напряжение пропорционально суммарному магнитному потоку выходной обмотки, который равен

$$\begin{aligned}
\Phi &= \int_{-2\pi m}^0 m\Phi_{0m} \left(1 + \frac{1}{2\pi m} \Theta\right) \cos \Theta d\Theta + \int_0^{2\pi m} m\Phi_{0m} \left(1 - \frac{1}{2\pi m} \Theta\right) \cos \Theta d\Theta = \\
&= m\Phi_{0m} \left[ \int_{-2\pi m}^0 \cos \Theta d\Theta + \int_{-2\pi m}^0 \frac{1}{2\pi m} \Theta \cos \Theta d\Theta - \int_0^{2\pi m} \frac{1}{2\pi m} \Theta \cos \Theta d\Theta \right] = \\
&= m\Phi_{0m} \left\{ \sin \Theta \Big|_{-2\pi m}^0 + \sin \Theta \Big|_0^{2\pi m} + \frac{1}{2\pi m} (\cos \Theta \cdot \Theta \sin \Theta) \Big|_{-2\pi m}^0 - \frac{1}{2\pi m} (\cos \Theta + \Theta \sin \Theta) \Big|_0^{2\pi m} \right\} = \\
&= m\Phi_{0m} \left\{ -\sin \Theta(-2\pi m) + \sin(2\pi m) + \frac{1}{2\pi m} [1 - \cos(-2\pi m) - (-2\pi m) \sin(-2\pi m)] - \right. \\
&\quad \left. - \cos(2\pi m) - 2\pi m \sin(2\pi m) + 1 \right\} = m\Phi_{0m} \left[ 2 \sin(2\pi m) + \frac{1}{2\pi m} [2 - 2 \cos(2\pi m) - 4\pi m \sin(2\pi m)] \right] = \\
&= m\Phi_{0m} \left[ 2 \sin(2\pi m) + \frac{1}{\pi m} - \frac{1}{\pi m} \cos(2\pi m) - 2 \sin(2\pi m) \right] = \frac{1}{\pi} \Phi_{0m} [1 - \cos(2\pi m)].
\end{aligned}$$

Таким образом, суммарный магнитный поток, обеспечивающий выходное напряжение, изменяется при изменении  $m$  по следующему закону  $\Phi = \frac{1}{\pi} \Phi_{0m} [1 - \cos(2\pi m)]$ .

Из уравнения следует вывод о том, что наиболее эффективным является значение  $m = 0,5$ , так как  $\cos \pi = -1$  и в этом случае  $\Phi = \frac{2}{\pi} \Phi_{0m}$ .

Начальная фаза этого магнитного потока, изменяющегося по синусоидальному закону, во времени определяется начальной фазой намагничивающей силы зубца с максимальным магнитным потоком.

### Заключение

Развитие теории и практики применения датчиков механических величин на основе фазовращателей с бегущим магнитным полем позволяет разрабатывать информационно-измерительные системы с повышенной точностью и быстродействием. Области применения фазовращателей расширяются благодаря малым габаритам, обусловленным малой эффективной длиной магнитопроводов. Использование принципа локального взаимодействия обмоток расширяет возможности применения бегущих магнитных полей.

### Библиографический список

1. Батоврин, А. А. Электромашинные фазовращатели / А. А. Батоврин. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 124 с.
2. Горячев, В. Я. Анализ систематической погрешности информационно-измерительной системы на основе датчика биений с бегущим магнитным полем / В. Я. Горячев, О. В. Гаврина, Ю. К. Чапчиков, Ю. А. Шатова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 1 (25). – С. 46–57.
3. Горячев, В. Я. Фазовые датчики механических величин с бегущим магнитным полем : моногр. / В. Я. Горячев. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. – 308 с.
4. Горячев, В. Я. Датчики механических величин на базе фазовращателей с бегущим магнитным полем / В. Я. Горячев, Т. Ю. Бростилова, С. В. Кисляков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 1 (17). – С. 59–69.
5. Горячев, В. Я. Редукционные датчики угловых перемещений с бегущим магнитным полем / В. Я. Горячев, В. И. Волчихин, Ю. А. Шатова // Новые промышленные технологии. – 2007. – № 2. – С. 45–50.
6. Горячев, В. Я. Влияние конструктивных параметров фазовых датчиков с бегущим магнитным полем на их метрологические характеристики / В. Я. Горячев, В. И. Волчихин // Датчики и системы. – 2006. – Вып. 12. – С. 18–22.
7. Экспериментальная информационно-измерительная система для проведения испытаний на воздействие вибрации / С. А. Бростилов, Д. А. Голушко, Н. В. Горячев, В. А. Трусов, Н. К. Юрков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 64–70.

8. *Осадчий, Е. П.* Проектирование датчиков для измерения механических величин / Е. П. Осадчий. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с.
9. *Гришко, А. К.* Управление электромагнитной устойчивостью радиоэлектронных систем на основе вероятностного анализа динамики информационного конфликта / А. К. Гришко, А. С. Жумабаева, Н. К. Юрков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 4 (18). – С. 66–75.
10. *Конюхов, Н. Е.* Унифицированный преобразователь линейных перемещений / Н. Е. Конюхов, А. А. Курицкий // Приборы и системы управления. – 1984. – № 10. – С. 29–30.
11. *Зарипов, М. Ф.* Индуктивные преобразователи больших линейных перемещений с распределенными параметрами магнитных цепей : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Зарипов М. Ф. – М., 1963.

---

**Кисляков Сергей Вячеславович**

инженер,  
кафедра электроэнергетики и электротехники,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: sergey\_kuz3ws@mail.ru

**Kislyakov Sergey Vyacheslavovich**

engineer,  
sub-department of power and electrical engineering,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

---

УДК 621.314.25

**Кисляков, С. В.**

**Параметры электромагнитных фазовращателей в информационно-измерительной системе /**  
С. В. Кисляков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2018. – № 4 (26). – С. 16–23. –  
DOI 10.21685/2307-5538-2018-4-3.