

## ФАЗОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассматривается принцип построения многополюсного фазового преобразователя перемещений с бегущим полем с реализацией многофазной обмотки, расположенной в одной плоскости. Данный преобразователь обладает высокой эксплуатационной надежностью, технологичен в изготовлении и может монтироваться на криволинейные поверхности.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, информационная линейка, обмотка, магнитопровод, фаза, измерительный элемент.

В системах автоматизированного неразрушающего контроля объектов подвижного состава железных дорог, в каналах обратной связи позиционных систем автоматического управления, например, крупногабаритных промышленных роботов и манипуляторов, возникает задача воспроизведения протяженных пространственных координат. При решении этой задачи необходимо использовать измерительные преобразователи перемещений [1].

В настоящее время известно много измерительных преобразователей линейных перемещений, реализующих различные методы преобразования [2, 3]: реостатные, емкостные, индуктивные преобразователи и др., содержащие чувствительный элемент и контактирующий с ним съемный элемент, при относительном перемещении которых формируется сигнал, пропорциональный этому перемещению [4]. Большинство первичных преобразователей перемещений являются аналоговыми устройствами, информативным параметром выходного сигнала которых является изменение его амплитуды.

Одним из методов преобразования исходного сигнала является фазовый. Фаза получаемого сигнала является наиболее удобным и естественным параметром для дальнейшей цифровой обработки результатов измерения. Средства решения этой задачи сводятся к фазовым преобразователям, схемотехнические представления которых обширны. Ниже приведены некоторые из них.

Фазовый преобразователь перемещения, принцип действия которого основан на возникновении геликоидальной неустойчивости полупроводниковой плазмы, помещенной в продольные электрическое и магнитное поля [5]. Чувствительный элемент преобразователя (рис. 1а) выполнен в виде стержня 1 из электронного германия, снабженного двумя торцевыми токовыми контактами 3 и 4. Стержень расположен в магнитном поле, создаваемом магнитами 2. К токовым контактам через постоянный ре-

зистор 6 подключен генератор напряжения 5, создающий электрическое поле в стержне.

При превышении напряженностей электрического  $E$  и магнитного  $H$  полей некоторых пороговых значений  $E_n$  и  $H_n$  в полупроводниковом стержне возникают колебания протекающего по нему тока. Этот эффект обусловлен возникновением геликоидального возмущения электронно-дырочной плазмы, которое под действием электрического поля, усиливаясь, перемещается в направлении дрейфа неосновных носителей со скоростью  $V$  [6]:

$$V = \mu_o E = \frac{\mu_n \mu_p (n - p)}{n \mu_n - p \mu_p},$$

где  $\mu_o$  — биполярная подвижность;  $\mu_n, \mu_p$  — подвижности электронов и дырок соответственно;  $n, p$  — концентрации электронов и дырок.

Усиление первоначального возмущения, при ранее упомянутых условиях приводит к возникновению абсолютной винтовой неустойчивости электронно-дырочной плазмы. В результате возникает колебания продольного тока, протекающего по полупроводниковому образцу, и колебания поперечного напряжения. Причем частоты колебаний тока и напряжения равны.

Для вывода возникающих в стержне электрических колебаний во внешнюю цепь в рассматриваемом фазовом преобразователе используются резистор 6 и емкостной зонд 7.

Начальная фаза колебаний напряжения, снимаемого с резистора 6, будет постоянной. Начальная фаза поперечного напряжения, снимаемого с помощью емкостного зонда, будет зависеть от места его расположения и скорости распространения винтового возмущения  $V$ .

Это свойство используется при построении преобразователя перемещений — разность фаз напряжений, снимаемых с резистора и емкостного зонда,

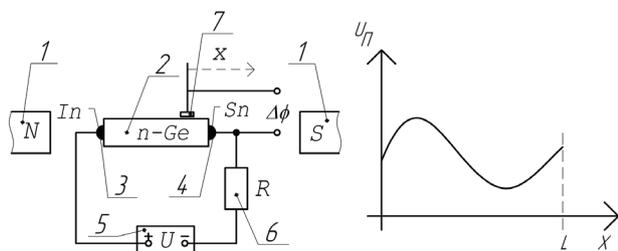


Рис. 1. Схема фазового преобразователя перемещения на основе геликоидальной неустойчивости полупроводниковой плазмы (а); кривая распределения поперечного напряжения по длине образца (б)

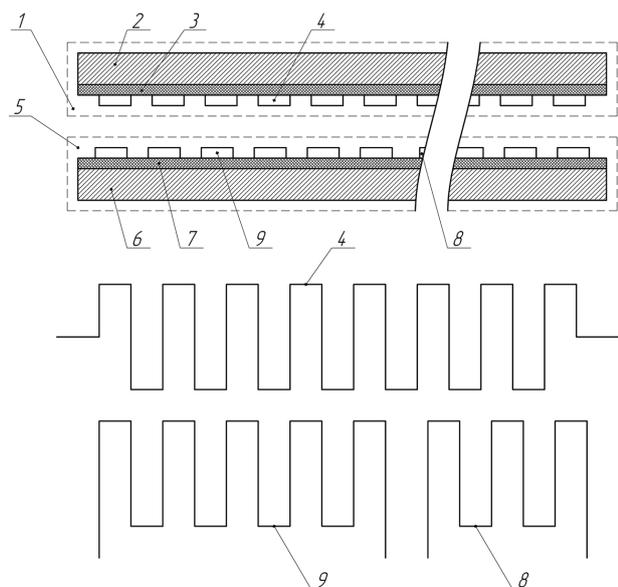


Рис. 2. Конструкция индуктосина и форма обмоток

и будет зависеть от перемещения контролируемого объекта  $\Delta\phi = F(x)$ .

Диапазон измеряемых перемещений и рабочий участок на кривой распределения поперечного напряжения  $U_{\perp}$  (рис. 1б) по длине  $L$  стержневого полупроводникового элемента определяется условием, согласно которому разность фаз колебаний напряжений, снимаемых с резистора 6 и зонда 7, не должна превышать  $2\pi$  для предотвращения неоднозначности определения контролируемого перемещения. Диапазон перемещений ограничивается длиной стержня и возможностью создания магнитной системы с индукцией магнитного поля, необходимой для возбуждения электрических колебаний в стержне. Исходя из перечисленных ограничений, диапазон измерения на практике не превышает трех-четырех сантиметров.

Для измерения линейных перемещений широко используются фазовые преобразователи, содержащие информационные линейки с размещенными на них обмотками [7, 8].

Примером таких преобразователей являются линейные индуктосины, имеющие неподвижную и подвижную части. На рис. 2 показана одна из возможных конструкций индуктосина. Неподвижная часть 1 (линейка индуктосина) представляет собой стальную полосу 2, на одной из поверхностей которой через изолирующую прокладку 3 выполнена плоская печатная обмотка 4, имеющая форму

«меандра». С обмотки 4 снимается выходной сигнал (напряжение) преобразователя. Подвижная часть 5 (головка) выполнена в виде прямоугольной пластины 6, на одной стороне которой нанесена печатная обмотка, отделенная от стального основания изоляционным слоем 7. Проводники обмотки объединены в секции и образуют две обмотки 8 и 9, взаимно сдвинутые в продольном направлении на  $1/4$  шага обмотки линейки, которые называются синусной и косинусной. Величины индукционной связи между обмоткой линейки и каждой из обмоток головки при их относительном перемещении изменяются периодически по синусоидальному закону. По обмоткам 8 и 9 пропускаются синхронные токи одной и той же амплитуды, но сдвинутые по фазе на  $90$  градусов. При этом сигнал  $E_{\phi}$  на выходе обмотки 4:

$$E_{\phi} = \omega I_m M_m \sin(\omega t + \varphi),$$

где  $I_m$  — амплитуда тока;  $M_m$  — коэффициент взаимной индукции;  $\omega$  — круговая частота тока;  $\varphi$  — начальная фаза выходного напряжения.

При этом начальная фаза выходного сигнала индуктосина будет зависеть от величины перемещения измерительной головки. Так как индуктосин является многополюсным измерительным преобразователем, то фазу выходного сигнала можно представить в виде:

$$\varphi = \frac{\pi}{p} (n\tau + x),$$

где  $p$  — число пар полюсов;  $\tau = 2p$  — шаг обмотки;  $x$  — измеряемое линейное перемещение по дуге окружности в пределах шага;  $n$  — количество периодов.

Подобные преобразователи позволяют измерять перемещения, достигающие нескольких метров. При их работе необходимо производить очень точную настройку взаимного расположения элементов преобразователя, особенно зазора между линейками. Кроме того, они чувствительны к загрязнению и характеризуются сравнительно низким уровнем выходного сигнала — порядка  $10$ – $20$  мВ.

Большую группу представляют фазовые преобразователи, содержащие магнитопроводы с размещенными на них обмотками. Примерами подобных преобразователей могут служить фазовые преобразователи с бегущим полем [9] и на основе линейного сельсина [10].

Преобразователь с использованием линейного сельсина (рис. 3) содержит неподвижный и подвижный магнитопроводы. Неподвижный магнитопровод 1 выполнен в виде тела вращения, с уложенной в его впазы трехфазной обмоткой 2. Числа витков фазных обмоток, уложенных в впазы вдоль магнитопровода, соответствуют синусоидальному закону. На подвижном магнитопроводе 3 выполнена однофазная обмотка 4. Подключенное к обмотке 4 подвижной части переменное напряжение наводит ЭДС в фазные обмотки 2, по амплитудам которых можно однозначно определить положение подвижной части в пределах одного полюсного деления обмоток фаз. Линии индукции магнитного поля замыкаются через неподвижный магнитопровод 1. Питательное напряжение можно подавать на неподвижные фазовые обмотки, а информацию снимать с обмотки подвижной части. При использовании сельсина в режиме фазового преобразователя на неподвижную многофазную обмотку подают

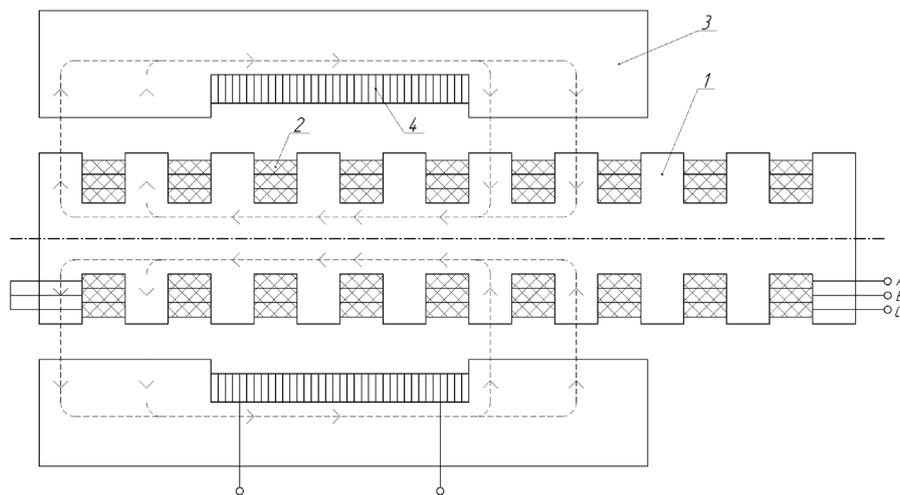


Рис. 3. Фазовый преобразователь на основе линейного сельсина

симметричное многофазное напряжение с соответствующим числом фаз и формируют вращающееся или бегущее магнитное поле. Обмотка 4 подвижной части, чаще однофазная, измеряет вектор ЭДС, значение модуля которой остается неизменным, а значение фазы однозначно отображает координату подвижной части в пределах одного полюсного деления.

Не вдаваясь в анализ недостатков преобразователей с магнитопроводами, отметим их общий недостаток, заключающийся в технологической сложности выполнения магнитопроводов и обмоток, особенно при большой длине перемещения контролируемого объекта, а также в том, что для обеспечения синусоидального закона изменения индукции вдоль магнитопровода необходимо обеспечить точное число витков по пазам, меняющееся по синусоидальному закону. Так как число витков может быть только целым, то уже имеет место методическая погрешность воспроизведения синусоидального закона.

В статье рассматривается фазовый преобразователь, в котором неподвижные обмотки не имеют собственного магнитопровода, их наматывают на плоскую линейку из изоляционного материала.

На рис. 4 показана обмотка 1 одной фазы. Ее наматывают на линейку 2 сначала в прямом, затем в обратном направлении с одинаковым шагом  $l$  прямыми участками, поэтому витки образуют треугольную форму с вершинами 3. На конце линейки намотку продолжают в обратном направлении таким образом, чтобы вершины 4 ее треугольников оказались напротив вершин 3 прямого направления при условии, что витки прямого и обратного направлений сдвинуты на полпериода, образуя ромбовидные контуры полюсов. При этом направления плотностей токов соседних контуров оказываются противоположными, как показано круглыми стрелками на рис. 4.

На рис. 5 показана трехфазная обмотка, секции которой вложены друг в друга в одной плоскости. Важным качеством такой конфигурации обмоток является технологическая простота обеспечения геометрического равенства конфигураций фаз и, следовательно, идентичность электрических параметров. Это повышает точность всего устройства. Для дальнейшего увеличения точности число фаз может быть увеличено. Очевидно, что максимально достижимая точность будет ограничена диаметром

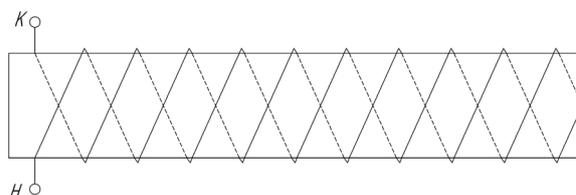


Рис. 4. Обмотка одной фазы

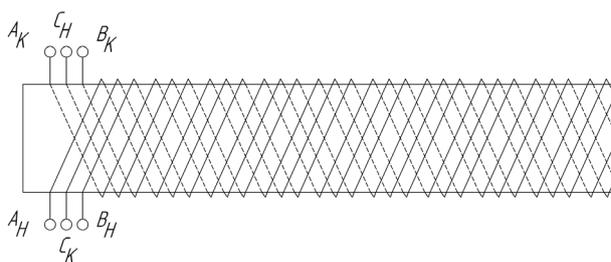


Рис. 5. Трехфазная обмотка

намоточного провода. Кроме того, при данном способе укладки обмоток перекрещивание электрических связей, как это имеет место при «меандровой» укладке, отсутствует, что повышает технологичность изготовления и эксплуатационную надежность устройства. Наличие промежутка между проводниками исключает межвитковое замыкание. Линейка достаточно легко монтируется на криволинейную поверхность.

Измерительный элемент (рис. 6), т. е. подвижная часть предлагаемого преобразователя, представляет собой трансформатор с разомкнутым магнитопроводом 1 и обмоткой 2, размещенный над линейкой. Текстолитовая или пластмассовая линейка с многофазной обмоткой 3 наклеивается непосредственно на несущую конструкцию объекта 4, например, автоматической системы, через изоляционную прокладку 5. Поверх линейки наклеивается защитное покрытие 6.

На неподвижную обмотку подают многофазное симметричное напряжение с соответствующим числом фаз и формируют вращающееся или бегущее магнитное поле. Магнитное поле, создаваемое многофазной обмоткой 3, замыкается через конструкцию объекта 4 и магнитопровод 1. В обмотке 2 наводится переменное напряжение, модуль кото-

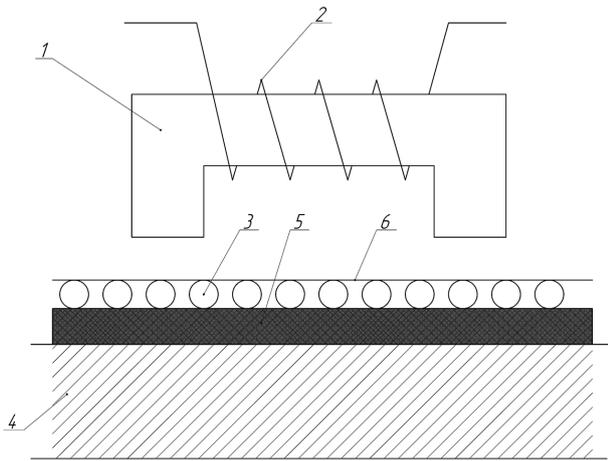


Рис. 6. Измерительный элемент фазового преобразователя

рого не зависит от перемещения измерительного элемента, а значение фазы определяется координатой подвижной части преобразователя. Дальнейшее преобразование фазы выходного сигнала преобразователя производится широко применяемыми схемотехническими средствами.

Измерительный элемент располагается на расстоянии 1–5 мм от поверхности линейки. Погрешность установки и изменение расстояния в процессе работы практически не влияет на фазу сигнала. Не влияет также угловое и поперечное смещение в плоскости линейки. Надежная механическая защита и жесткость крепления частей датчика на элементах конструкции системы обеспечивает стабильность параметров и высокую эксплуатационную надежность всей системы с датчиками данного типа.

Апробация устройства проведена на многокоординатном деревообрабатывающем станке с числовым программным управлением. Трехфазное напряжение в виде сдвинутых на угол 120 град. меандров вырабатывается микропроцессорной системой управления станком. После усиления оно подается через согласующий трансформатор на несколько датчиков по числу координат системы. Информационным параметром является фаза первой гармоники в обмотке трансформатора, которая выделяется фильтрацией.

Предлагаемое решение выгодно отличается от приведенных выше за счет достижения следующих положительных качеств:

- высокая технологичность изготовления, особенно при большой длине информационной линейки;
- увеличение точности воспроизведения требуемой конфигурации магнитного поля достигается простым добавлением числа фаз многофазной обмотки;
- достигнута высокая эксплуатационная надежность за счет отсутствия перекрещивающихся электрических связей и наличия изоляционных промежутков как между витками, так и фазами;
- возможность монтажа на криволинейные поверхности.

#### Библиографический список

1. George B., Tan Z., Nihtianov S. Advances in Capacitive, Eddy Current and Magnetic Displacement Sensors and

Corresponding Interfaces // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. Vol. 64, Issue 12. P. 9595–9607. DOI: 10.1109/TIE.2017.2726982.

2. Liu X., Peng K., Chen Z. [et al.]. A New Capacitive Displacement Sensor With Nanometer Accuracy and Long Range // IEEE Sensors Journal. 2016. Vol. 16, Issue 8. P. 2306–2316. DOI: 10.1109/jsen.2016.2521681.

3. Babu A., George B. Design and Development of a New Non-Contact Inductive Displacement Sensor // IEEE Sensors Journal. 2017. Vol. 18, Issue 18. P. 976–984. DOI: 10.1109/JSEN.2017.2780835.

4. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005. 592 с.

5. Cheredov A. I., Shchelkanov A. V. Displacement sensors with frequency output based on helical instability // 2014 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. Omsk, 2014. P. 1–4. DOI: 10.1109/Dynamics.2014.7005645.

6. Hurwitz C. E., McWhorter A. L. Growing helical density waves in a semiconductor plasmas // Physical Review Letters. 1964. Vol. 134 (4A). P. 1033–1050. DOI: 10.1103/PhysRev.134.A1033.

7. Shang X. J., Wang Q. J. The Design of New-type Digital Readout Device by Inductosyn // 2nd International Conference on Manufacturing, Singapore. 2014. Vol. 909. P. 439–443. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.909.439.

8. А. с. 392539 СССР, МПК G 08 C 9/04. Линейный индуктосин / Сафонов Л. Н. № 1633045/18-24; заявл. 05.03.71; опубл. 27.07.73. Бюл. № 32.

9. Горячев, В. Я. Фазовый датчик линейных перемещений / В. Я. Горячев, О. К. Абдирашев, Ю. А. Шатова, Т. Ю. Бростилова // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 7–9.

10. Пат. 2678724 Российская Федерация, МПК G 08c 19/48. Линейный сельсин / Хоменко Б. Л., Кобец А. М. № 2017143521; заявл. 12.12.17; опубл. 31.01.19. Бюл. № 4.

**АХМЕДЖАНОВ Равиль Абдрахманович**, кандидат технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС).

AuthorID (РИНЦ): 533818

**ЧЕГОДАЕВ Виктор Федорович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Автоматика и системы управления» ОмГУПС.

**ЧЕРЕДОВ Александр Иванович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

SPIN-код: 6957-1660

AuthorID (РИНЦ): 471995

**ЩЕЛКАНОВ Андрей Владимирович**, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ.

SPIN-код: 2564-1461

ORCID: 0000-0002-1354-8708

AuthorID (SCOPUS): 56447045400

ResearcherID: P-9053-2015

Адрес для переписки: shchelkanov@omgtu.ru

#### Для цитирования

Ахмеджанов Р. А., Чегодаев В. Ф., Чередов А. И., Щелканов А. В. Фазовый преобразователь перемещений // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 82–85. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-82-85.

Статья поступила в редакцию 30.09.2019 г.

© Р. А. Ахмеджанов, В. Ф. Чегодаев, А. И. Чередов, А. В. Щелканов