

УДК 621.317.334

РАЗРАБОТКА МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ УГЛА НАКЛОНА С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

© 2014 Д.Ю. Морозова, М.С. Сайкин

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И.Ленина

Поступила в редакцию 13.03.2014

В статье приведена классификация магнитожидкостных датчиков угла наклона. Дан сравнительный анализ конструкций датчиков. Разработаны рекомендации по их применению в технике.

Ключевые слова: *магнитная жидкость, датчик, чувствительный элемент*

Одним из направлений измерительной техники является использование новых физических эффектов и создание принципиально новых конструкций датчиков. Эффекты взаимодействия магнитных жидкостей с электромагнитным полем позволяют совершенствовать системы диагностики, повысить их чувствительность и точность измерений. Магнитная жидкость (МЖ) представляет собой коллоидный раствор частиц магнетита Fe_3O_4 в жидкости носителе [1, 2]. Для предотвращения слипания ферромагнитных частиц между собой их покрывают стабилизатором, в качестве которого используются поверхностно-активные вещества (ПАВ). Малый размер частиц порядка 100 ангстрем и их тепловое движение препятствует слипанию и оседанию частиц и обеспечивает устойчивость МЖ как коллоидной системы. Большое разнообразие физических свойств МЖ [3], а, именно, высокой намагниченности и текучести позволило создать принципиально новые датчики угла наклона, которые соединяют в себе достоинства традиционных индуктивных датчиков и жидкостных уровней. Они могут применяться в системах автопилотирования, в электроэнергетике, например, для контроля положения ЛЭП и угла наклона гидрогенератора (в особенности, оснащенного электромашиной или тиристорной системой самовозбуждения), а также в подъемно-транспортной технике.

Цель работы: разработка новых конструкций магнитожидкостных датчиков угла наклона (МЖДУН) с чувствительным элементом на постоянных магнитах на основании анализа

недостатков известных конструктивных схем МЖДУН, при использовании численного моделирования параметров магнитного поля в интегрированной среде ELCUT.

Методы разработок и исследований. Экспериментальные исследования проводились на образцах МЖДУН трёх различных конструкций. Теоретические исследования по оценке эксплуатационных характеристик проводились на основе численного моделирования.

В настоящее время для измерения угла наклона объектов в системах автоматического контроля применяются две конструкции МЖДУН. Одна из них (рис. 1) представляет собой цилиндрический корпус 1, частично заполненный МЖ 2, которая используется в качестве чувствительного элемента. С наружной поверхности корпуса расположены первичная 3 и вторичные 4 обмотки, а с обоих его концов установлены крышки 5 с уплотнителями 6. Принцип действия датчика основан на изменении индуктивности обмоток при перетекании МЖ внутри цилиндрического корпуса. Недостатком данной конструкции является усиление магнитной седиментации МЖ из-за магнитной адгезии дисперсных магнитных частиц к внутренним стенкам корпуса, что приводит к увеличению времени переходного процесса при резком изменении угла наклона МЖДУН. Прилипание МЖ к внутренним стенкам контейнера замедляет и затрудняет перетекание её под действием внешних сил и снижает быстродействие и точность измерений датчика.

Представленный датчик имеет следующие технические характеристики [4]: диапазон измеряемых углов – $\pm 15^\circ$; точность, угл. мин. – ± 1 ; диапазон рабочих температур – $\pm 50^\circ C$; работоспособность после воздействия механических ударов с перегрузкой – 1500 м/с^2 ; время успокоения после воздействия ударных нагрузок – не более 1,5 с; масса – не более 0,7 кг; гарантийный срок хранения и эксплуатации – до 6 лет.

Морозова Дарья Юрьевна, магистрант. E-mail: Lagutkina_D@mail.ru

Сайкин Михаил Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий. E-mail: Saikin@eef.ispu.ru

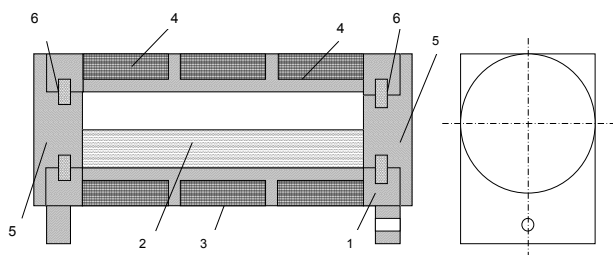


Рис. 1. Конструкция МЖДУН с МЖ в качестве чувствительного элемента

Другая конструкция МЖДУН [5] (рис. 2) лишена этого недостатка. В ней в качестве чувствительного элемента используется система из постоянных магнитов, т.е. реализуется свойство левитации постоянного магнита, помещённого в МЖ. Основным узлом датчика является чувствительный к углу наклона элемент, состоящий из стального сердечника 1 и двух постоянных магнитов 2 подвешенных в МЖ 3 внутри немагнитного корпуса 4. При наклоне датчика происходит смещение чувствительного элемента, при этом осевая составляющая силы тяжести уравнивается силой отталкивания со стороны магнитов 5, установленных внутри крышек 6, которые имеют возможность перемещения вдоль корпуса. Это позволяет регулировать диапазон измерения углов наклона датчика. МЖ обеспечивает устойчивый подвес чувствительного элемента и гидродинамический режим трения в зазоре, что позволяет ему перемещаться вдоль корпуса с малым коэффициентом трения, а также обеспечивает повышенное быстродействие системы. Недостаток этой конструкции заключается в возникновении перепада давлений между полостями при перемещении чувствительного элемента, что вызывает снижение быстродействия и в некоторых случаях может привести к нарушению симметрии положения чувствительного элемента по отношению к оси симметрии датчика.

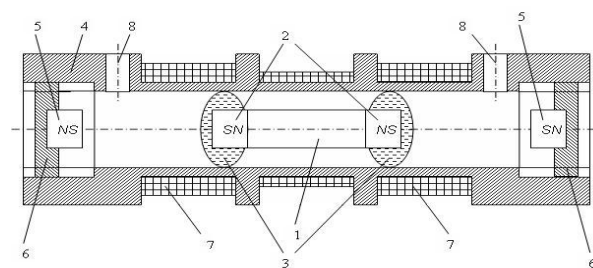


Рис. 2. Конструкция МЖДУН с дисковыми постоянными магнитами

При экспериментальном сравнении двух конструкций МЖДУН (рис. 1, 2) получено снижение времени успокоения после воздействия ударных нагрузок в 3 раза.

Одна из новых разработок МЖДУН представлена на рис. 3 [6]. Она состоит из цилиндрического корпуса 1, выполненного из немагнитопроводного материала, охваченного измерительными обмотками 2, и имеющего торцевые крышки 3 с отверстиями, в которых установлены центрирующие кольцевые постоянные магниты 4. Чувствительный элемент состоит из двух кольцевых постоянных магнитов 5, между внутренними торцевыми поверхностями которых расположена магнитопроводная втулка 6 со сквозным отверстием. Центрирующие кольцевые магниты 4 направлены одноименными полюсами к кольцевым постоянным магнитам 5 чувствительного элемента. В цилиндрическом зазоре, образованном кольцевыми постоянными магнитами 5 и внутренней поверхностью корпуса 1 находится МЖ 7. Достоинство данной конструкции состоит в повышении быстродействия и чувствительности работы МЖДУН за счёт использования постоянных магнитов в форме колец, что позволяет исключить действие перепада давлений на чувствительный элемент.

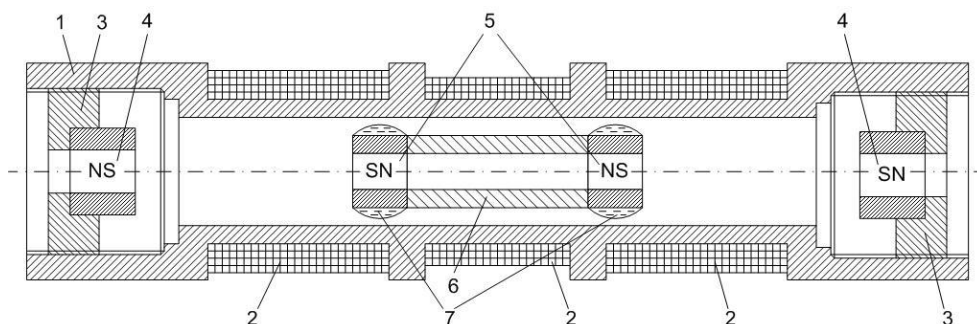


Рис. 3. Конструкция МЖДУН с кольцевыми постоянными магнитами

Представленный датчик имеет следующие технические характеристики: диапазон измеряемых углов – $\pm 20^\circ$; точность – ± 5 мин. угл. минут; диапазон рабочих температур – $\pm 50^\circ\text{C}$;

работоспособность после воздействия механических ударов с перегрузкой – 1500 м/с^2 ; время успокоения после воздействия ударных нагрузок –

не более 0,2 с; масса – не более 0,2 кг; гарантийный срок хранения и эксплуатации – до 10 лет.

Кроме этого, в предлагаемой конструкции можно регулировать диапазон измеряемых углов МЖДУН за счёт перемещения торцевых крышек 3 с центрирующими магнитами 4 вдоль корпуса датчика 1, изменяя, таким образом, расстояние между обращёнными друг к другу постоянными центрирующими магнитами 4 и магнитами чувствительного элемента 5. Таким образом, диапазон измеряемых углов увеличивается при уменьшении расстояния между постоянными магнитами чувствительного элемента 5 и центрирующими магнитами 4, а чувствительность измерений повышается с увеличением этого расстояния. Данная разработка прошла испытания на специальном технологическом оборудовании, а также при горизонтировании люльки автоподъёмника.

Основные достоинства конструкции МЖДУН (рис. 4) состоят в возможности тонкой настройки и простоте дозаправки МЖ во время работы МЖДУН [7]. Внутри цилиндрического немагнитопроводного корпуса 1 расположены две измерительные обмотки 2, закреплённые в немагнитопроводных втулках 3. Два центрирующих магнита 4, закреплённые в немагнитопроводных втулках 5 и расположены с внешней стороны корпуса. Чувствительный элемент состоит из двух кольцевых постоянных магнитов 6, между внутренними торцевыми поверхностями которых расположена магнитопроводная втулка 7, и находится с внешней цилиндрической поверхности корпуса. Центрирующие кольцевые магниты 4 направлены одноименными полюсами к кольцевым постоянным магнитам 6 чувствительного элемента. В цилиндрическом зазоре, образованном кольцевыми постоянными магнитами 6 и наружной поверхностью корпуса 1 находится МЖ 8, которая удерживается в нём пондеромоторной силой. Обмотка 9 расположена в обойме 10 и находится внутри корпуса 1.

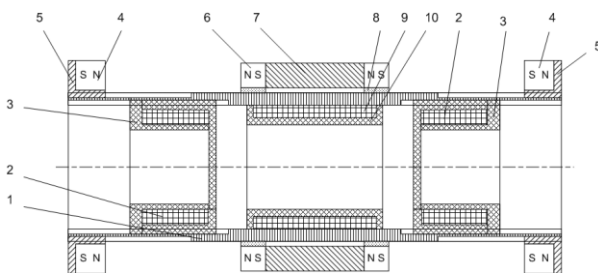
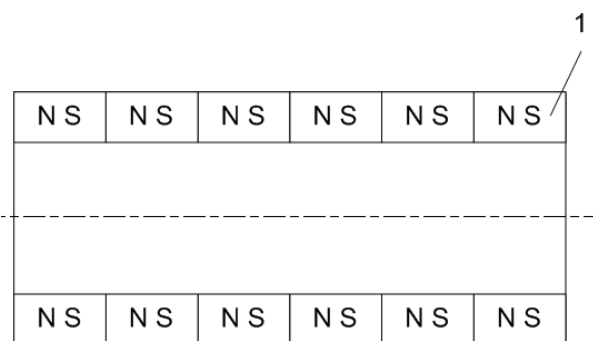


Рис. 4. Конструкция МЖДУН с чувствительным элементом, расположенным с внешней стороны корпуса

Для регулирования диапазона измеряемых углов на обращённых друг к другу внутренних цилиндрических поверхностях втулок 3 и корпуса 1 и наружных немагнитопроводных втулок 5 и корпуса 1 выполнена резьба. За счет перемещения немагнитопроводных втулок 5 с центрирующими магнитами 4 вдоль корпуса 1 можно проводить настройку эксплуатационных характеристик МЖДУН. Диапазон измеряемых углов увеличивается при уменьшении расстояния между постоянными магнитами чувствительного элемента 6 и центрирующими магнитами 4, а чувствительность измерений повышается с увеличением этого расстояния. Для расширения диапазона измеряемых углов и повышения точности настройки предусмотрена тонкая регулировка, которая достигается перемещением измерительных обмоток 2, закреплённых в немагнитопроводных втулках 3 вдоль внутренней цилиндрической поверхности корпуса 1 по резьбе. Диапазон измеряемых углов увеличивается при уменьшении расстояния между измерительными обмотками 2, а чувствительность измерений повышается с увеличением этого расстояния. МЖ 8 находится между магнитами чувствительного элемента и наружной цилиндрической поверхностью корпуса и обеспечивает удержание чувствительного элемента с наружной стороны корпуса 1 без касания его поверхности. При этом чувствительный элемент перемещается вдоль поверхности корпуса при его наклоне с минимальным трением. За состоянием МЖ 8 можно наблюдать визуально и проводить её дозаправку с внешней цилиндрической поверхности корпуса под постоянные магниты 6 чувствительного элемента.

Чувствительный элемент может быть выполнен из нескольких кольцевых магнитов 1, примыкающих друг к другу разноименными полюсами торцевых поверхностей (рис. 5а), или из одного кольцевого магнита 1, к торцевым поверхностям которого примыкают магнитопроводные втулки 2 (рис. 5б).



а)

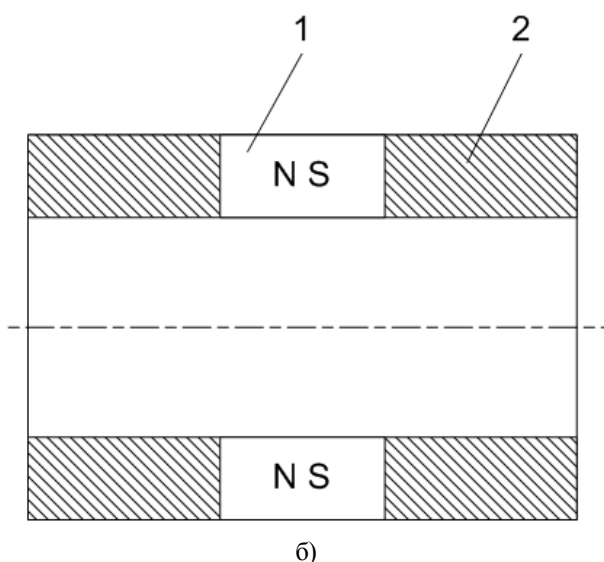


Рис. 5. Варианты исполнения чувствительного элемента

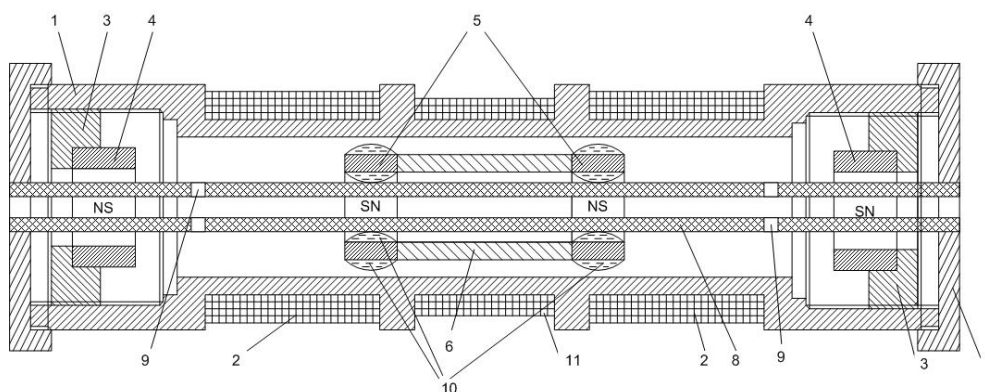


Рис. 6. Конструкция МЖДУН с кольцевыми постоянными магнитами

Конструкция МЖДУН содержит цилиндрический корпус 1, на котором расположены вторичные обмотки 2. В крышках 3, выполненных с возможностью перемещения внутри корпуса по резьбе, установлены центрирующие магниты 4. Чувствительный элемент состоит из кольцевых магнитов 5 и магнитопроводной втулки 6. Основное отличие МЖДУН заключается в том, что к наружной цилиндрической поверхности корпуса 1 с помощью резьбы крепятся торцевые крышки 7, в которых закреплён цилиндрический стержень 8 из немагнитопроводного материала, проходящий вдоль внутреннего объёма корпуса. По обе стороны чувствительного элемента в стержне выполнено хотя бы по одному отверстию 9. Зазор между внутренней цилиндрической поверхностью корпуса и чувствительным элементом заполнен МЖ 10. На наружной поверхности цилиндрического корпуса расположена первичная обмотка 11. Между цилиндрическим стержнем 8 и постоянными магнитами 5 образован дополнительный зазор, заполненный МЖ. Это позволило увеличить силу подвеса чувствительного элемента и обеспечить

Представленную конструкцию МЖДУН целесообразно применять в закрытых помещениях, например, для контроля горизонтирования энергетического оборудования электрических станций. Недостатком конструкций МЖДУН (рис. 3, 4) является действие силы тяжести на чувствительный элемент, т.к. МЖ обеспечивает его левитацию только по одной внутренней цилиндрической поверхности корпуса, что вызывает его отклонения от горизонтальной оси корпуса при работе устройства и снижает точность измерений.

Для устранения этого недостатка предлагается конструкция МЖДУН [8], представленная на рис. 6. Основное преимущество данной конструкции – расширение эксплуатационных возможностей и срока службы МЖДУН за счёт дополнительного конструктивного элемента.

его симметричное положение в корпусе, что повышает точность измерений. Представленную конструкцию МЖДУН целесообразно использовать в авиационной технике, а также для контроля отклонения положения нефтегазопроводов. Проведены численные исследования [10, 11], которые подтверждают высокие эксплуатационные показатели этого МЖДУН,

Полученные результаты и их анализ. Экспериментальные и численные исследования разработанных МЖДУН показали улучшение эксплуатационных характеристик, а именно, увеличение диапазона измеряемых углов от $\pm 15^\circ$ до $\pm 20^\circ$, повышение точности от 1 градуса, до 5 минут, уменьшение времени успокоения с 1,5 с, до 0,2 с и снижение массы в 3,5 раза. Срок эксплуатации МЖДУН вырос с 6 до 10 лет.

Выводы: разработаны МЖДУН с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Даны рекомендации по их применению на технических объектах. Изготовлены опытные образцы и проведены испытания некоторых конструкций МЖДУН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Фертман, В.Е.* Магнитные жидкости. Справочное пособие. – Минск. Высшая школа. 1988. 84 с.
2. *Берковский, Б.М.* Магнитные жидкости / *Б.М. Берковский, В.Ф. Медведев, М.С. Краков.* – М.: Химия. 1989. 240 с.
3. *Курченков, А.Г.* Магнитные жидкости – новый эффективный материал в машиностроении // *Механизация и автоматизация производства.* 1990. №4. С. 38.
4. *Бойко, Н.Г.* Магнитожидкостные датчики угла наклона, ускорения, давления / *Н.Г. Бойко, С.А. Касаткин, А.В. Ключин* // *Механизация и автоматизация производства.* 1990. №4. С. 14.
5. *Щелькалов, Ю.Я.* Магнитожидкостное устройство для определения угла наклона (варианты) / *Ю.Я. Щелькалов, А.З. Аврамчук, Н.Н. Русакова* и др. // Патент №2115091, МКИ G01C9/20, опублик. 10.07.1998, Бюл. №8.
6. *Сайкин, М.С.* Магнитожидкостное устройство для определения угла наклона / *М.С. Сайкин, Д.Ю. Морозова* // Патент на полезную модель, Российская Федерация N 113349, МКИ G01C 9/00, Приоритет от 18.10.2011, опублик. 10.02.2012, Бюл. N 4.
7. *Сайкин, М.С.* Магнитожидкостное устройство для определения угла наклона / *М.С. Сайкин, Д.Ю. Морозова* // Патент на полезную модель, Российская Федерация N 126451, МКИ G01C 9/00, Приоритет от 20.03.2012, опублик. 27.03.2013, Бюл. N 9.
8. *Сайкин, М.С.* Магнитожидкостное устройство для определения угла наклона / *М.С. Сайкин, Д.Ю. Морозова* // Патент на полезную модель, Российская Федерация N 128318, МКИ G01C 9/20, Приоритет от 20.03.2012, опублик. 20.05.2013, Бюл. N 14.
9. *Сайкин, М.С.* Численное исследование распределения магнитной индукции в магнитожидкостном датчике с постоянными магнитами / *М.С. Сайкин, Д.Ю. Морозова* // Сборник научных трудов 15-й Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям. – Россия, Плёс, 4-7 сентября 2012 г. С. 315-320.
10. *Морозова, Д.Ю.* Исследование влияния формы магнитов на распределение магнитной индукции в магнитожидкостном датчике / *Д.Ю. Морозова, М.С. Сайкин* // Международная научно-техническая конференция «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). Сборник научных трудов. – Иваново, 2013. С. 40-43.

THE DEVELOPMENT OF INCLINATION ANGLE MAGNETIC LIQUID SENSORS WITH SENSITIVE ELEMENT ON PERMANENT MAGNETS

© 2014 D.Yu. Morozova, M.S. Saykin

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin

Classification of inclination angle magnetic liquid sensors is given in article. The comparative analysis of sensors designs is given. Recommendations about their application in equipment are developed.

Key words: *magnetic liquid, sensor, sensitive element*

Dariya Morozova, Undergraduate Student. E-mail: Lagutkina_D@mail.ru
Mikhail Ssaykin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Theoretical Bases of Electrotechnics and Electrotechnologies. E-mail: Saikin@eef.ispu.ru