

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 53.087.92 : 621.317.39.084.2

ДОВГЯЛО ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВ И
ЖИДКОСТЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ХОЛЛА**

01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Новополоцк -2002

Работа выполнена в Учреждении образования «Полоцкий государственный университет»

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор Борисенко В.Е.
Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»,
проректор по учебной работе

кандидат физико-математических наук Демченко А.И.
Унитарное предприятие «Минский НИИ радиоматериалов»,
заместитель директора по научной работе

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Толочко Н.К.
Институт технической акустики НАН Беларуси,
и.о. директора

кандидат технических наук, доцент Соловьев В.В.
Учреждение образования «Высший государственный колледж связи»,
кафедра организации и технологии почтовой связи

Оппонирующая организация: Государственный научно-производственный концерн точного машиностроения «Планар»

Защита состоится «___» декабря 2002 г. в ___ на заседании Совета К.02.19.03. при Учреждении образования «Полоцкий государственный университет».

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29.
Факс (+375 214) 550679.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования «Полоцкий государственный университет».

Автореферат разослан ___ ноября 2002 г.

Ученый секретарь
Совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, профессор

В.М. Константинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Современные тенденции развития измерительных и регистрирующих систем в составе технологического оборудования требуют поиска новых методологических, конструкторских и технологических решений с максимальным использованием научно достигнутого и промышленно освоенного задела для получения прогрессивных приборных структур.

Датчики давления широко применяются в промышленности, быту, научных исследованиях и составляют значительную часть технологических комплексов. Традиционные принципы измерения давления (тензо- и пьезометрический, емкостный и индуктивный, частотный и магниторезистивный) не всегда обеспечивают комплекс требований, предъявляемый потребителями, особенно в части обеспечения заданных точности, быстродействия, динамического диапазона, надежности работы. Поэтому актуальной является разработка более совершенных принципов преобразования и способов их реализации.

Перспективным представляется реализация принципа преобразования давления в изменение магнитного поля и получение электрического сигнала посредством гальваномагнитного элемента Холла, успешно зарекомендовавшего себя в конструкциях датчиков положения, перемещения, ориентации, угла поворота, частоты вращения. В связи с этим конструктивно-технологическая реализация указанного принципа положена в основу построения датчика давления с улучшенными метрологическими характеристиками, который может быть использован в информационно-измерительных системах и технологических установках для отраслей приборо-, аппарато- и машиностроения.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнялась в учреждении образования «Полоцкий государственный университет» в период с 1996 по 2002 гг. в рамках ГНТП «Белсенсор» и госбюджетных НИР: ГБ 4296 «Разработка диагностических систем на основе датчиков физических величин с разработкой чувствительных элементов преобразователей неэлектрических величин в электрические», 1996 – 2000 гг., № ГР 1997138 (научный руководитель к.т.н., доц. Грозберг Ю.Г.); ГБ 2720 «Датчик давления и перемещения с гальваномагнитным преобразователем», 2000 г., № ГР 20001049 (научный руководитель Довгяло Д.А.); ГБ 2921 «Гофрированные металлические мембраны для датчиков физических величин», 2001 г., № ГР 2001350 (научный руководитель Довгяло Д.А.); проекта Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь 2002 – 2004 гг. Т 02 М – 003 «Разработка физико-математических моделей малогабаритных дипольных и квадрупольных магнитных систем и их использование в преобразователях избыточного давления с микроэлектронным преобразователем Холла» (научный руководитель Довгяло Д.А.).

Целью диссертационной работы является установление механизмов и закономерностей преобразования давления газов и жидкостей на упругую мембрану в электрический сигнал с помощью микроэлектронного элемента Холла и разработка на этой основе конструкции и технологии изготовления датчиков избыточного давления газов и жидкостей для применения в технологических комплексах и электрофизических установках.

Задачи исследований. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выявить основные закономерности структурной реализации датчиков давления, использующих различные принципы преобразования, и датчиков физических величин с применением гальваномагнитных преобразователей;
- разработать принцип и структурные модели преобразования давления в электрический сигнал с применением микроэлектронного элемента Холла;
- исследовать характеристики магнитного поля в зазоре малогабаритных дипольной и квадрупольных магнитных систем в зависимости от их конструктивных и технологических параметров и установить оптимальную конфигурацию магнитной системы с учетом требований к датчику давления по чувствительности и линейности;
- исследовать работу металлических мембранных чувствительных элементов с неравномерным гофром, способы их установки и определить влияние масс, присоединенных к жесткому центру, на упругие характеристики мембран;
- разработать, изготовить и испытать опытный образец датчика избыточного давления газов и жидкостей.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются датчик давления, металлические мембраны, малогабаритные магнитные системы и гальваномагнитные устройства – микроэлектронные элементы Холла. Предметом исследования являются электрофизические процессы, протекающие в датчике давления, – преобразование давления в механическое перемещение упругого элемента, преобразование этого перемещения в изменение магнитного поля и преобразование магнитного поля в электрический сигнал гальваномагнитным преобразователем.

Методология и методы проведенного исследования. Расчет магнитных систем датчика давления проведен математическим моделированием по методу отношений путем вычисления магнитных проводимостей. Упругие характеристики металлических мембран определены математическим моделированием с использованием метода наложения. При выполнении экспериментальных исследований магнитных систем, металлических мембран и градуировки преобразователя Холла использован метод прямых наблюдений с многократными повторениями. Испытания опытного образца датчика давления проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 22520-85.

Научная новизна и значимость полученных результатов состоят в следующем:

1. Разработан принцип преобразования избыточного давления газов и жидкостей в выходной электрический сигнал, который отличается тем, что воздействующее давление, деформируя мембрану, приводит к непосредственному линейному механическому перемещению магнитной системы относительно регистратора магнитного поля. В результате происходит изменение магнитного потока и, следовательно, выходного электрического сигнала регистратора магнитного поля, в качестве которого использован электрофизический микроэлектронный преобразователь Холла.

2. Показано, что конфигурация в виде классической квадрупольной магнитной системы, состоящая из сопряженных П-образных дипольных магнитных систем, построенных на основе постоянных магнитов SmCo_5 с габаритными размерами $3 \times 3 \times 4$ мм и магнитной арматуры из стали 10895, позволяет увеличить градиенты поля, присущие аналогично реализованной дипольной магнитной системе, с 54 Тл/м до $160 \div 330$ Тл/м (в зависимости от расстояний между составляющими дипольными системами) и уменьшить нелинейность характеристики $B(X)$ с 7,7 % (для дипольной) до $3,1 \div 4,0$ % (для квадрупольной) в диапазоне механического перемещения ΔX от 0 до $1,5 \div 2,0$ мм. Предложенная квадрупольная раздвижная магнитная система позволяет достичь показателей линейности и градиентов, присущих классической квадрупольной системе, и обеспечить возможность ее оптимальной практической реализации в датчике давления.

3. Установлено, что индукция в дипольной системе П-образной формы на магнитной нейтрали максимальна в воздушном зазоре полюсных наконечников и имеет обратно степенную ($3/2$) зависимость от расстояния X по мере выдвижения регистратора магнитного поля из рабочего зазора. Индукция на магнитной нейтрали в зазоре квадрупольной раздвижной системы прямо пропорциональна максимальной индукции в зазоре и косинусу отношения смещения регистратора магнитного поля от положения с максимальной индукцией к расстоянию между сопряженными дипольными системами, образующими квадрупольную.

4. Предложена модель металлической мембраны, отличающаяся учетом неравномерности гофра тригонометрическими функциями и позволяющая рассчитывать ее упругую характеристику. Установлено, что подбором профиля гофрировки мембранного чувствительного элемента возможно преобразование давления в диапазоне $1 \text{ Па} \div 25 \text{ кПа}$ в перемещение с нелинейностью не более 5,5 %. Экспериментально доказано, что влияние массы $M_{\text{пр}}$, присоединенной к жесткому центру мембраны, имеющей массу $M_{\text{м}}$, математически удобно учитывать кубическими множителями, зависящими от отношения $M_{\text{пр}}/M_{\text{м}}$, к коэффициентам k_1 и k_2 , которые в методе наложения полностью определяют профиль гофрировки.

Практическая значимость полученных результатов:

1. Разработаны научно обоснованные рекомендации, математические модели, алгоритм и пакет программного обеспечения, позволяющие сократить материальные и временные затраты при проектировании электрофизических устройств, базирующихся на применении малогабаритных дипольных, квадрупольных и квадрупольных раздвижных магнитных систем.

Результаты исследований магнитных систем использованы при выполнении НИР и ОКР УП «Минский НИИ радиоматериалов».

2. Разработаны математическая модель, алгоритм и программный комплекс, позволяющие проводить моделирование работы металлических мембранных элементов с равномерным и неравномерным гофром, с массой, присоединенной к жесткому центру, и учитывающие способы установки мембраны в корпус датчика на ЭВМ с минимальными затратами машинных ресурсов (погрешности расчетов

зависимостей прогибов от давления не превышают 1,5 %). Моделирование упругих характеристик обеспечивает прогнозирование и корректную интерпретацию результатов экспериментальных исследований и может использоваться для инженерных расчетов мембран на этапе проектирования электрофизических устройств.

Результаты исследования металлических мембран использованы РПУП «Завод «Измеритель» при производстве датчиковой аппаратуры.

3. На основе отечественного микроэлектронного преобразователя Холла ХГ-01 (GaAs), малогабаритных постоянных магнитов (SmCo_5) и гофрированной металлической мембраны из материала 36НХТЮ разработана конструкция датчика избыточного давления газов и жидкостей (в том числе агрессивных сред) на диапазон давлений 1 Па÷25 кПа, спроектирован вторичный электронный преобразователь, изготовлен опытный образец датчика, проведены его исследования и комплексные испытания. Показано, что основная погрешность опытного образца датчика избыточного давления не превышает 0,5 % и за счет преобразования посредством магнитного поля обеспечивается высокая чувствительность к давлению (изменение выходного сигнала происходит при изменении входной величины на 0,004÷0,02 %).

Новизна предложенных технических решений конструкций датчиков давления защищена тремя патентами и заявкой на изобретения и полезные модели Республики Беларусь.

Опытный образец датчика прошел метрологический контроль в «Испытательном центре» РПУП «Завод «Измеритель» по программе технических испытаний, утвержденной Полоцким Центром стандартизации и метрологии.

Датчик внедрен в систему водоснабжения солодовенного участка УП «Полоцкий пивоваренный завод».

4. Разработанные программа и методика испытаний датчика избыточного давления использованы Новополоцким филиалом РУП БЕЛТЭИ при составлении программ, методик испытаний и проверок датчиков разности и избыточного давления.

5. Методика проектирования датчиков и разработанное программное обеспечение используются при обучении студентов специальности Т.08.01 в УО «Полоцкий государственный университет» в рамках дисциплин «Микроэлектронные датчики контрольно-диагностических средств», «Испытания и сертификация РЭС», «Технология и автоматизация РЭС».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Регистрация давлений газов и жидкостей, отличающаяся измерением электрического тока, возникающего в элементе Холла, за счет изменения магнитного поля магнитной системы, непосредственно прикрепленной к чувствительной мембране, обеспечивает измерение избыточных давлений с основной погрешностью не более 0,5 % в диапазоне 1 Па ÷ 25 кПа.

2. Квадрупольная раздвижная магнитная система, состоящая из сопряженных П-образных магнитных элементов, позволяет создавать градиенты магнитного поля в рабочем зазоре до 330 Тл/м, что повышает чувствительность использующего ее датчика давления до 1÷5 Па.

3. Моделирование магнитной системы датчика избыточного давления с преобразователем Холла путем разбиения ее на элементарные участки и замены участков сложной геометрической формы несколькими элементами простой геометрической формы обеспечивает погрешность при расчетах магнитной индукции на магнитной нейтрали не более 10 %.

4. Расчет упругих характеристик гофрированных металлических мембран в рамках метода наложения и их оптимизация требуют точного описания профиля гофра тригонометрическими функциями.

Личный вклад соискателя. Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в разработке и изготовлении экспериментальных установок, проведении экспериментальных исследований, математической обработке экспериментальных данных и составлении алгоритмов для создания программного обеспечения расчета магнитных систем и металлических мембран. Разработка программного обеспечения проведена П.В. Мильто и Д.А. Макаровым. Автором лично предложены принцип и модели процесса преобразования давления в электрический сигнал. В совместно опубликованных работах автор осуществлял постановку задачи, предлагал и обосновывал направления решения научных проблем, анализировал полученные результаты и формулировал основные выводы.

Апробация результатов. Материалы, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: международной научно-технической конференции «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (Минск, 1998); 53-й международной научно-технической конференции профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов Белорусской государственной политехнической академии (Минск, 1999); 5-й международной конференции «Теория и техника передачи, приема и обработки информации» (Харьков, 1999); 2-й и 3-й научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (Гомель, 1999, 2000); международной научно-технической конференции «Разработка импортозамещающих технологий в химической промышленности» (Минск, 1999); международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники ПЭМ-99» (Таганрог, 1999); республиканской научно-технической конференции студентов и аспирантов «НИРС-2000» (Гродно, 2000); международном научно-техническом семинаре «Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, 2000); международной научно-технической конференции «Метрологическое обеспечение качества – 2000» (Минск, 2000); международной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы физики» (Саранск, 2001); международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении» (Минск, 2001); II международной научно-технической конференции «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» (Новополоцк, 2002); международной

научно-технической конференции «Новые технологии изготовления многокристальных модулей» (Минск, 2002).

Автор отмечен дипломом Республиканского общества изобретателей и рационализаторов как лауреат конкурса среди молодых изобретателей и рационализаторов 2000 года. Работа «Металлические гофрированные мембраны», выполненная студентом П.В. Мильто под руководством автора, удостоена диплома первой степени на Республиканском конкурсе студенческих научных работ 2001 года.

Опубликованность результатов. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 26 печатных работах общим объемом 85 страниц. По материалам диссертационной работы опубликовано: 1 статья в научном журнале, 3 статьи в сборниках научных трудов, 1 статья депонирована, 15 статей в сборниках материалов конференций, 1 статья в сборнике тезисов докладов конференции. Получено 2 патента на полезную модель РБ, патент на изобретение РБ, подана заявка на изобретение, находящаяся на стадии экспертизы. Основные материалы работы содержатся в 3 отчетах по НИР. В процессе работы над диссертацией издано учебное пособие «Микроэлектронные датчики» с грифом Министерства образования Республики Беларусь для студентов специальности «Проектирование и производство радиоэлектронных средств» высших учебных заведений объемом 308 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 200 страниц, из которых 140 страниц машинописного текста. Диссертация содержит 41 рисунок на 37 страницах, 16 таблиц на 23 страницах, библиографию из 188 наименований на 16 страницах и 2 приложения (приложение 1 на 6 страницах, приложение 2 – в виде отдельной книги на 54 страницах).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** кратко излагается состояние предметной области.

В **общей характеристике работы** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи, изложены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен обзор литературы, представлены результаты патентного поиска и определено современное состояние исследований, разработок и применения датчиков давления и гальваномагнитных преобразователей в информационно-измерительных системах электрофизических установок и технологических комплексов.

Отмечено, что современные датчики давления основаны на различных принципах преобразования входного параметра, среди которых можно выделить потенциометрический, тензометрический, пьезометрический, индуктивный, емкостный, частотный, магниторезистивный. Однако существующие принципы преобразования не всегда обеспечивают комплекс требований по

чувствительности, точности, линейности, динамическому диапазону, возможности работы в агрессивных средах, предъявляемых потребителями. Поэтому идет постоянный поиск путей создания датчиков давления с улучшенными метрологическими характеристиками.

Систематизированы основные гальваномагнитные эффекты и реализованные на них преобразователи магнитного поля. Отмечены преимущества микроэлектронных преобразователей Холла (МПХ) и показаны области их применения в датчиках положения, перемещения, бесконтактных переключателях, преобразователях угла поворота, частоты и скорости вращения.

О датчиках давления с МПХ в литературных источниках приводятся лишь краткие сведения либо о возможности создания таких датчиков, либо рассматриваются сложные и малопонятные для анализа конструктивные решения. Рассмотрение патентной информации показывает наличие ряда практически повторяющихся заявок, ограниченного числа патентов и авторских свидетельств. В работе приведены наиболее типичные конструктивные решения датчиков абсолютного, избыточного и разности давлений. Установлено, что их основными элементами являются: преобразователь магнитного поля, магнитная система (МС) и воспринимающий давление упругий чувствительный элемент (УЧЭ). Рассмотрены структурные схемы построения датчиков механических величин с МПХ. Показано, что для получения в датчике давления высоких показателей чувствительности и линейности преобразования магнитное поле должно иметь линейную зависимость по направлению механического перемещения, а градиенты поля должны быть постоянными и иметь высокое значение. Проанализированы методы расчета систем с постоянными магнитами и применение УЧЭ.

В заключение на основе анализа литературных и патентных данных сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** разрабатывается принцип построения датчика избыточного давления на основе МПХ. Преобразующий блок датчика давления может быть реализован по структурной схеме, содержащей УЧЭ, МС и непосредственно гальваномагнитный элемент – МПХ (рис. 1).

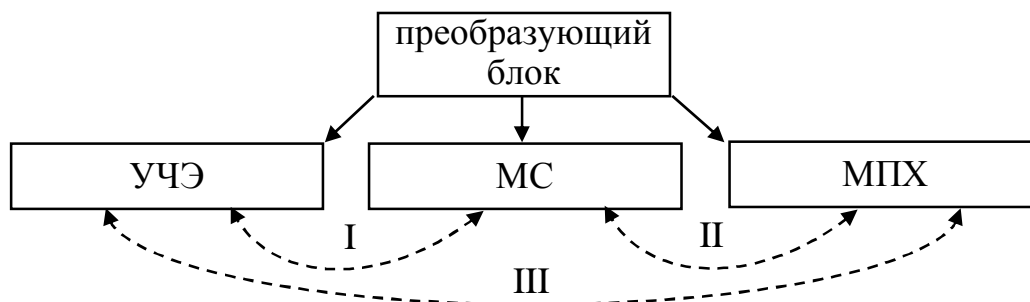


Рис. 1. Структура построения преобразующего блока
Штриховыми линиями отображены функциональные связи

Измеряемое давление воздействует на мембранный УЧЭ, который за счет своей деформации осуществляет преобразование давления в механическое перемещение. Это перемещение непосредственно передается к конструктивно взаимосвязанным МС и МПХ (МС – МПХ). Происходит изменение взаимного расположения составляющих МС – МПХ и, соответственно, магнитного потока, пронизывающего плоскость МПХ. Выходной сигнал МПХ прямо

пропорционален величине воздействующей на него магнитной индукции и, следовательно, эквивалентен величине измеряемого давления.

Совместная работа МС – МПХ дает возможность регистрировать линейные механические перемещения указанных элементов друг относительно друга на величины порядка сотых долей микрометра, т.к. связь между элементами осуществляется посредством магнитного поля. В связи с этим даже незначительные деформации УЧЭ могут быть преобразованы в изменение электрического сигнала, т.е. обеспечивается высокая чувствительность датчика к измеряемым давлениям. Представленный принцип преобразования обеспечивает высокую линейность в датчике давления, которая в общем случае зависит от рабочих характеристик УЧЭ, МС и МПХ.

На работу датчика давления кроме структурных составляющих существенное влияние оказывают функциональные связи между ними (см. рис. 1). Они предполагают разнообразные варианты реализации принципа преобразования, в основе которых лежат различные типы построения МС (функциональная связь II) и взаимодействие между УЧЭ и составляющими МС – МПХ (функциональные связи I и III). Разработано несколько конструктивных моделей преобразования давления в выходной электрический сигнал:

1. МПХ и постоянный магнит, установленный на УЧЭ, перемещаются в параллельных плоскостях. В данной модели применяется открытая МС (без концентрации магнитного потока). Такая система имеет большие поля рассеяния и незначительный градиент магнитной индукции по величине перемещения при высокой линейности преобразования.

2. Классическая квадрупольная МС, состоящая из сопряженных II–образных дипольных, когда МПХ перемещается совместно с мембраной, а постоянные магниты неподвижны. Достоинством модели является значительное повышение чувствительности, что обусловлено большим градиентом магнитной индукции в направлении механического перемещения. Недостатком такого построения являются погрешности, возникающие за счет установки на мембрану достаточно массивной части, содержащей рамку с МПХ. Кроме того, технически сложно обеспечить точность начального взаимного размещения элементов МС – МПХ.

3. Дипольная МС II–образной формы устанавливается на УЧЭ, а МПХ неподвижен. Эта модель разработана с целью повышения точности измерений. Изменение взаимного расположения составляющих МС – МПХ обеспечивается перемещением дипольной МС относительно неподвижного МПХ. Поставленная задача решается за счет того, что градиент магнитной индукции дипольной МС в направлении механического перемещения имеет достаточно высокое значение. Кроме того, технически упрощается необходимое взаимное расположение элементов МС – МПХ. Однако диапазон линейности преобразования перемещения невелик.

4. Квадрупольная раздвижная МС: МПХ и одна часть МС неподвижны, другая часть МС устанавливается на УЧЭ. В квадрупольной раздвижной МС градиент индукции в направлении механического перемещения имеет очень высокое значение, присущее классической квадрупольной системе, а конструктивная реализация модели упрощается, т.е. данный вариант построения

практически устраняет недостатки, присущие остальным моделям. Кроме того, зависимость величины магнитной индукции от механического перемещения имеет значительный линейный участок, что обуславливает увеличение линейности и расширение динамического диапазона работы. Недостатком рассматриваемой структуры является наличие присоединенной массы на УЧЭ, но ее величина по сравнению со вторым вариантом значительно уменьшается.

Новизна предложенных технических решений конструкций датчиков давления защищена патентами Республики Беларусь.

Анализ моделей преобразования давления в выходной электрический сигнал позволил сделать следующие выводы:

- наиболее рациональной структурой преобразующего блока датчика давления на основе электрофизического гальваноманнитного преобразователя является система, состоящая из УЧЭ, МС и непосредственно преобразователя магнитного поля;

- первичное преобразование давления в перемещение УЧЭ, осуществляемое за счет деформации мембраны, непосредственно воспринимается взаимосвязанными элементами МС – МПХ;

- применение классической квадрупольной МС, образованной сопряженными Π -образными дипольными, позволяет получить высокие значения градиентов магнитной индукции dB/dX и линейность функции $B(X)$;

- впервые предложенная квадрупольная раздвижная МС дает возможность использовать достоинства классической квадрупольной МС и обеспечить оптимальную практическую реализацию в датчике давления.

В **третьей главе** рассмотрены вопросы проектирования МС датчика давления. Квадрупольная МС представляет собой две сопряженные дипольные МС, объединенные в одно функциональное целое, причем ориентация полюсов магнитов противоположна. Дипольная МС предполагает наличие двух наконечников, расположенных на полюсах магнита, форма которых должна обеспечивать концентрацию магнитного поля в зазоре. Разработка МС с постоянными магнитами сводится к выбору материалов, размеров магнитов и концентраторов, конфигурации МС, обеспечивающих получение необходимого значения магнитной индукции и ее градиента в рабочем воздушном зазоре при наилучшем использовании свойств материала постоянного магнита. Поэтому задача проектирования квадрупольной МС с целью выявления характера функциональной связи Π (см. рис. 1) разбивается на несколько подзадач: выбор формы и материалов магнитов, полюсных наконечников, расчет магнитной индукции в зазоре дипольной МС, экспериментальные исследования дипольной МС, расчет и экспериментальные исследования квадрупольных МС.

Исходя из величины максимального энергетического произведения и стоимости для МС датчика давления выбраны магниты из материала SmCo_5 (КС - 37) с габаритными размерами $3 \times 3 \times 4$ мм (рис. 2), а выбор магнитной арматуры произведен исходя из механических свойств и магнитной проницаемости – сталь 10895. Расчет дипольной МС проведен методом отношений. Магнитная цепь условно приводится к двухузловой эквивалентной электрической схеме с сосредоточенными параметрами. Магнитное сопротивление арматуры при условии, если ее состояние далеко от насыщения,

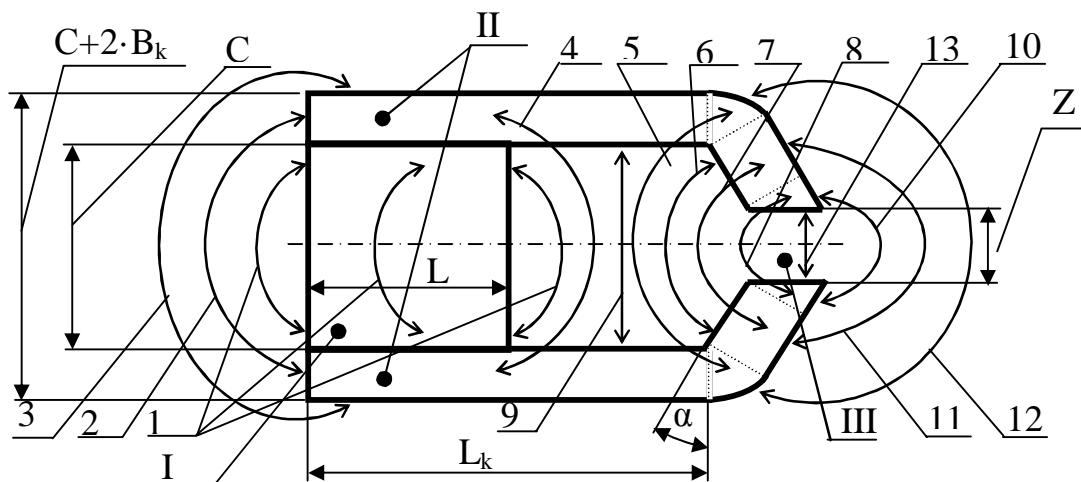


Рис. 2. Дипольная магнитная система. Схема путей рассеяния магнитного потока:

I – магнит; II – концентраторы магнитного потока; III – рабочий зазор; проводимости а) магнита: 1 – Λ_m , б) концентраторов: 2 – Λ_{a_2} – между боковыми торцами; 3 – Λ_{a_3} – между прямыми участками наружных (внешних) поверхностей; 4 – Λ_{a_4} – между боковыми поверхностями прямых участков; 5 – Λ_{a_5} – между секторными участками боковых поверхностей; 6 – Λ_{a_6} – между внутренними участками изогнутых поверхностей; 7 и 8 – Λ_{a_7} и Λ_{a_8} – между боковыми участками изогнутых поверхностей; 9 – Λ_{a_9} – между внутренними прямыми участками; 10 и 11 – $\Lambda_{a_{10}}$ – между внешними участками изогнутых поверхностей; 12 – $\Lambda_{a_{12}}$ – между внешними участками изгиба; в) рабочего зазора: 13 – Λ_r

приравнивается к нулю. В результате характеристика магнита определяется не участком на кривой размагничивания, а точкой.

Исходными данными к расчету дипольной МС II-образной формы являются размерные соотношения составляющих МС и энергетические характеристики магнита. Для расчета системы концентратор магнитного потока условно разбивается на участки, ограниченные пунктирными линиями (см. рис. 2), вычисление магнитных проводимостей каждого из которых не является сложной математической задачей. Границы деления выбраны с учетом упрощения расчета, а именно: выделяются прямоугольные области МС и рассчитываются проводимости между плоскими параллельными поверхностями. Секторные области приводятся к прямоугольным таким образом, чтобы центр масс сектора совпадал с центром масс прямоугольной области. Для определения магнитных проводимостей поверхностей, находящихся под углом α , вычисляются их проекции на координатные оси, затем используются уравнения эллипсов, осями которого являются длины проекций, при этом суммарная проводимость определяется длиной прямой, проведенной под углом $\alpha/2$ в первой четверти графика эллипса. После вычисления суммарной проводимости рассеяния арматуры строятся кривая размагничивания, прямая проводимости магнита, кривая магнитного возврата и прямая внешней проводимости системы. На пересечении кривой магнитного возврата и прямой внешней проводимости определяются координаты рабочей точки и индукция в зазоре. По приведенной методике можно определить максимальную индукцию на магнитной нейтрали в зазоре дипольной МС. Экспериментальные исследования проведены при длинах прямой части концентратора L_k 4÷7 мм с шагом 0,5 мм. Нижний предел этого ряда

определяется габаритными размерами магнита и щупа с преобразователем магнитного поля, верхний – значительным уменьшением максимальной индукции в зазоре дипольной системы. Также проведены исследования при различной величине толщины концентраторов B_k : 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2 мм. Ширина концентратора A_k в ходе эксперимента постоянна и равна ширине магнита – 3 мм. Угол изгиба концентраторов $\alpha=30^\circ$ (при такой величине наблюдается наименьшее рассеяние магнитного потока). Для реализации МС датчика давления использованы концентраторы с параметрами $L_k=4$ мм, $B_k=1$ мм.

В общем случае индукция в зазоре квадрупольной МС описывается выражением

$$B = B_{\max} \cdot f(X, Z_{\text{sys}}), \quad (1)$$

где B – магнитная индукция на магнитной нейтрали системы; B_{\max} – значение максимальной индукции, достигаемое в зазоре МС; $f(X, Z_{\text{sys}})$ – функция, зависящая как от расстояния X на нейтрали между точкой, в которой наблюдается максимальное значение B_{\max} и точкой измерения магнитной индукции, так и от расстояния Z_{sys} между сопряженными дипольными МС.

Функция $f(X, Z_{\text{sys}})$ определяет характер поведения магнитной индукции на нейтрали системы и сложна для теоретического определения. Поэтому она аппроксимирована на основе опытных данных. В ходе эксперимента величина Z_{sys} между краями концентраторов магнитного потока изменялась с шагом 0,1 мм в диапазоне 0÷4,2 мм. Установлено, что градиенты поля дипольной МС составляют 54 Тл/м в диапазоне изменения $\Delta X=2,5$ мм (величина нелинейности $B(X)$ равна 7,7 %), а в квадрупольных МС, в зависимости от расстояний между составляющими их дипольными МС, изменяются от 154,5 Тл/м до 328,2 Тл/м в диапазоне ΔX от 0 до 1÷2 мм, причем нелинейность функции $B(X)$ возрастает до 3,1÷4,0 %.

Математическая обработка полученных экспериментальных результатов и математическое моделирование позволили получить следующие зависимости индукции в зазоре на нейтрали магнитных систем:

1. Дипольная МС

$$B = \frac{B_{\max}}{1 + \frac{X^{\left(\frac{3}{2}\right)}}{k}}, \quad (2)$$

где X – смещение измерителя магнитной индукции относительно положения с B_{\max} ; k – коэффициент, зависящий от ширины измерителя магнитной индукции.

2. Квадрупольная МС

$$B = B_{\max} \cdot \cos \left(\frac{\pi \cdot (\sqrt{X} - 1)}{\varepsilon + \sqrt{Z_{\text{sys}}}} \right), \quad (3)$$

где B_{\max} – максимальное значение магнитной индукции в зазоре дипольной МС, размеры магнита и концентраторов которой, соответствуют квадрупольной МС; ε – коэффициент, учитывающий геометрические размеры зазоров МС и ширину измерителя магнитной индукции; в числителе (3) «-1» учитывает смещение

измерителя магнитной индукции от положения, когда плоскость, касательная к полюсным наконечникам, проходит через его вертикальную ось симметрии.

Моделирование МС датчика избыточного давления с МПХ путем разбиения ее на элементарные участки и замены участков сложной геометрической формы несколькими элементами простой геометрической формы обеспечивает погрешности при расчетах не более 10 %.

Четвертая глава посвящена разработке упругого чувствительного элемента датчика давления. УЧЭ является измерительным элементом, преобразующим давление в перемещение МС, и проектируется таким образом, чтобы с необходимой точностью воспринимать входную величину и с наименьшими потерями информации передавать выходную величину последующему измерительному узлу (см. рис. 1, функциональные связи I и III). Кроме того, УЧЭ – конструктивный элемент датчика, служащий узлом крепления других элементов (одной части квадрупольной раздвижной МС) и обеспечивающий защиту измерительного узла от дестабилизирующих внешних воздействий. Применение гофрированной металлической мембраны с неравномерным гофром позволяет обеспечить указанные требования и, в отличие от других типов УЧЭ, подбирать необходимый вид упругой характеристики $\omega(p)$ путем изменения формы и геометрических параметров профиля.

Анализ промышленно производимых мембран и требований, предъявляемых к УЧЭ, жесткому центру и их материалам, согласованию динамических диапазонов работы упругого чувствительного элемента и магнитной системы применительно к датчику давления с МПХ, позволил определить общую форму профиля мембраны (материал – сталь 36НХТЮ). Наилучшее сходство с необходимым по геометрической форме и размерам имеет профиль промышленно выпускаемой мембраны, показанный на рис. 3.

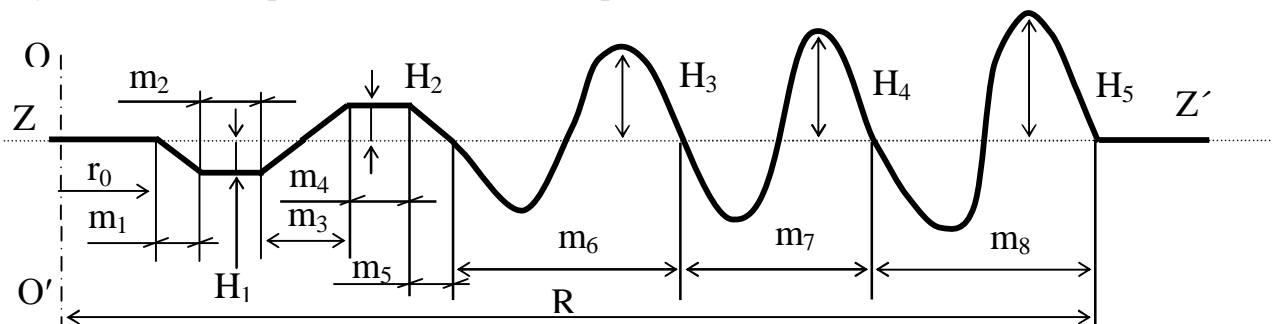


Рис. 3. Гофрированная мембрана с неравномерной гофрировкой

Для расчета в аналитической форме упругих характеристик мембран основное применение нашел метод наложения. Он дает хорошие результаты при нахождении упругой характеристики плоской мембраны и его можно использовать для определения упругой характеристики гофрированной мембраны, учитывая форму профиля и размеры гофра. По этому методу мембрана условно разбивается на участки (см. рис. 3).

Упругая характеристика мембраны, связывающая давление с прогибом, представляет собой уравнение с линейным и кубическим членами. Коэффициенты в этом уравнении определяются видом заделки мембраны: у линейного члена – при жесткой заделке, у кубического – при гибкой. В свою очередь они сложным

образом зависят от параметров геометрии профиля k_1 и k_2 . Коэффициент k_1 представляет собой отношение длины срединной образующей профиля к длине участка гофрировки. Коэффициент k_2 равен отношению осевых моментов инерции сечения гофрированной и плоской (аналогичной по радиусу и толщине гофрированной) мембран относительно оси $Z - Z'$ (см. рис. 3).

Для расчета зависимости $\omega(p)$ мембраны встает задача определения k_1 и k_2 с учетом неравномерности гофра. С этой целью разработана модель, согласно которой мембрана разбивается на элементарные участки. Вычисление значений параметров k_1 и k_2 на участках простой геометрической формы с помощью математического описания профиля гофра не вызывает затруднений. Общие значения k_1 и k_2 определяются суммированием по всей длине мембраны. Показано, что по разработанному алгоритму можно подбирать требуемую форму упругой характеристики мембраны с неравномерной гофрировкой, изменяя вид гофра и учитывая параметры профиля математически.

В датчике давления на жесткий центр мембраны устанавливается малогабаритная МС (см. рис. 1, функциональная связь I), обладающая определенной массой. Поэтому исследовано влияние присоединенной массы ($M_{пр}$) на упругую характеристику мембраны массой M_m . Для установки одной части квадрупольной раздвижной МС на мембране предусмотрен жесткий центр из сплава ВТ 9, перфорированный для уменьшения массы.

Аналитический вывод упругой характеристики мембраны с присоединенной массой из дифференциальных уравнений, приводимых в основополагающих работах Л.Е. Андреевой, затруднителен в связи со сложностью определения системы дифференциальных уравнений и их граничных условий. Поэтому определение влияния $M_{пр}$ на упругую характеристику произведено по результатам экспериментов. Исследования влияния $M_{пр}$ на величины прогиба мембраны проведены при $0 < M_{пр} < M_m$. Расширение диапазона исследований в сторону больших значений $M_{пр}$ нецелесообразно, т.к. присутствие значительной массы на жестком центре приводит к появлению прогибов при отсутствии давления и гистерезису упругой характеристики. В результате получены следующие выражения

$$g_1 = \left(\frac{M_m + M_{пр}}{M_m - M_{пр}} \right)^3 \quad (4)$$

$$g_2 = 1 + \left(\frac{M_{пр}}{M_m} \right)^3 \quad (5)$$

Множители g_1 и g_2 введены для параметров геометрии профиля k_1 и k_2 . Это более целесообразно, чем изменение коэффициентов перед линейным и кубическим членами в уравнении $\omega(p)$, т.к. k_1 и k_2 не столько определяются видом упругой характеристики, сколько осевой и радиальной жесткостью гофрировки и, следовательно, самой геометрией. Далее показано, что возрастание величины $M_{пр}$ приводит не только к увеличению прогибов мембраны, но и к изменению нелинейности упругой характеристики. Обобщенным параметром, учитывающим

оба эти значения, может служить их отношение, т.к. при проектировании устройств с мембраной необходимо стремиться к увеличению прогибов для повышения чувствительности к давлению и снижению нелинейности для уменьшения погрешности преобразования давления в перемещение. Установлено, что для датчика давления оптимальной является величина присоединенной массы $M_{пр} \approx (0,15 \div 0,2) \cdot M_M$.

Проведены исследования поведения мембраны при различных вариантах ее установки в оправку:

1. Мембрана расположена между плоскими поверхностями оправки, стянутыми по контуру болтами, т.е. мембрана не натянута по контуру.

2. Мембрана установлена на поверхность в форме буртика и обжата, т.е. натянута по контуру.

В случае 2 происходит изменение начальной формы профиля за счет натяжения, которое адекватно учитывается с помощью k_1 и k_2 . Выявлено, что натяжение по контуру увеличивает нелинейность упругой характеристики мембраны с 5,41 % до 8,18 % в диапазоне давлений 1 Па ÷ 25 кПа.

В выводах отмечено, что на основе метода наложения и вычисления тригонометрических функций, описывающих профиль, предложена математическая модель расчета упругой характеристики металлической мембраны с неравномерной гофрировкой. Погрешность расчета зависимости $\omega(p)$ не превышает 1,5 %.

Пятая глава посвящена разработке конструктива, электронного преобразователя, исследованиям и испытаниям опытного образца датчика избыточного давления с микроэлектронным преобразователем Холла. Корпус, входной штуцер, крышка корпуса, втулки-ограничители от перегрузок входной величины изготовлены из сплава 12Х18Н10Т, что позволяет использовать датчик в технологических комплексах и электрофизических установках для измерения давления агрессивных жидкостей и газов. Показано, что отечественные МПХ (производитель УП «Минский НИИ радиоматериалов») не только не уступают, но по некоторым параметрам (магнитная чувствительность, диапазон рабочих температур) превосходят зарубежные аналоги. Поэтому в конструкции датчика давления использован МПХ марки ХГ-01. Этот преобразователь (GaAs) может быть использован как для низко-, так и для высокотемпературных измерений.

Испытания опытного образца датчика избыточного давления проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 22520-85 в «Испытательном центре» РПУП «Завод «Измеритель» по программе технических испытаний, утвержденной Полоцким Центром стандартизации и метрологии.

В выводах проведено сравнение разработанного датчика с импортными аналогами, представлены области внедрения результатов диссертационной работы с прогнозируемыми показателями в виде эффектов: экономического – в производственном комплексе УП «Полоцкий пивоваренный завод» (экономия 2÷2,5 млн. рублей в год); временного – в УП «Минский НИИ радиоматериалов» и РПУП «Завод «Измеритель» за счет сокращения затрат на проектирование магнитных систем и мембран (20–30 %). Показано, что датчик избыточного давления с микроэлектронным преобразователем Холла по совокупности

основных технических параметров превосходит промышленно производимые аналоги вследствие:

- высокой чувствительности к воздействующим давлениям (изменение выходного сигнала происходит при изменении давления на $1 \div 5$ Па), что обусловлено преобразованием давления в линейное перемещение гофрированной мембраной и регистрацию этого перемещения взаимосвязанными составляющими гальваномагнитный элемент Холла – магнитная система;

- возможности измерения избыточных давлений агрессивных жидкостей и газов, т.к. элементы датчика, взаимодействующие с измеряемой средой, изготовлены из коррозионно-стойких материалов;

- применения отечественного датчика Холла и комплектующих вторичного электронного преобразователя с невысокой стоимостью;

- относительной простоты конструктивного исполнения датчика, позволяющего без дополнительных изменений применить микропроцессорную реализацию принципа преобразования и осуществить температурную коррекцию, уменьшив основную погрешность до $0,1 \div 0,15$ %;

- высокой технологичности изготовления без применения специального оборудования и оснастки, т.е. имеется возможность наладить производство без больших материальных затрат;

- низкой ориентировочной себестоимости, составляющей при мелкосерийном производстве 94300 руб.

В **приложении 1** приведены диплом лауреата конкурса Республиканского общества изобретателей и рационализаторов среди молодых изобретателей и рационализаторов 2000 года и акты внедрения результатов диссертационной работы.

В **приложении 2** представлены сведения об ориентировочной потребности предприятий Республики Беларусь в датчиках давления на 1999 – 2005 гг.; примеры расчетов магнитной индукции в зазоре и упругой характеристики мембраны, их сравнение с экспериментальными значениями; фотографии датчика; фотографии и схемы экспериментальных установок; схема электрическая принципиальная вторичного преобразователя и перечень элементов к ней; протоколы испытаний опытного образца датчика давления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выбор в качестве основного элемента датчика давления гальваномагнитного преобразователя благодаря высокой устойчивости к механическим воздействиям, возможности получения непрерывных и линейных показаний в виде электрических сигналов любой частоты и формы, получению на выходе электрического сигнала, прямо пропорционального величине воздействующей индукции, обеспечивает высокую чувствительность первичного датчика давления к входной величине [1, 10, 11].

2. Разработан принцип преобразования давления газов и жидкостей в электрический сигнал с использованием гальваномагнитных элементов. Показано, что минимально необходимой и достаточной для практической реализации преобразующего блока датчика давления является структура, состоящая из упругого

чувствительного элемента, магнитной системы и непосредственно регистратора магнитного поля – микроэлектронного датчика Холла [2, 4, 8, 23, 24, 26].

3. Установлено, что использование П – образной формы дипольной магнитной системы, построенной на базе магнитов SmCo_5 типа КС-37 с габаритными размерами $3 \times 3 \times 4$ мм и магнитной арматуры из стали 10895 позволяет получить в зазоре системы максимальные уровни магнитной индукции порядка $0,2 \div 0,25$ Тл, что достаточно для устойчивого функционирования элемента Холла ХГ-01 (GaAs). Разработана математическая модель определения положения рабочей точки дипольной магнитной системы на кривой размагничивания и нахождения индукции в рабочем зазоре методом отношений, показывающая, что для адекватного моделирования магнитной системы достаточен учет размерных соотношений в ней и энергетических характеристик магнита [9, 13, 14, 15, 18].

4. Установлено, что по совокупности требований: градиент магнитной индукции по направлению перемещения, линейность преобразования, диапазон линейности наилучшие результаты достигаются при использовании классической квадрупольной магнитной системы. Впервые предложенная ее модификация – раздвижная квадрупольная система – использует перечисленные достоинства классической системы и обеспечивает возможность практической реализации в датчиках давления. Экспериментально определено, что для квадрупольной раздвижной магнитной системы, образованной сопряженными П–образными элементами, градиент индукции в направлении перемещения регистратора магнитного поля в первом приближении постоянен. При изменении взаимного расположения дипольных магнитных систем чувствительность в диапазоне перемещения лежит в интервале $160 \div 330$ Тл/м (нелинейность $3,1 \div 4,0$ %), тогда как для дипольной системы – 54 Тл/м (нелинейность – $7,7$ %) [3, 5, 7, 22, 25].

5. Предложена математическая модель определения упругой характеристики мембранного чувствительного элемента, показывающая, что применение неравномерной гофрировки у металлических мембран и ее учет в методе наложения с помощью тригонометрических функций позволяют проектировать мембраны с упругими характеристиками, с заданными линейностью, чувствительностью к давлению в требуемом динамическом диапазоне. Отмечено, что натяжение гофрированной мембраны по контуру за счет обжима при установке в корпус уменьшает линейность упругой характеристики (особенно в области малых давлений) на $3 \div 4$ %, но обеспечивает высокую герметичность измерительной камеры датчика. Присоединение к жесткому центру мембраны массы, равной массе магнитной системы ($0,6$ г), приводит к увеличению значений прогибов до $15,3$ % в диапазоне давлений 1 Па \div 25 кПа и нелинейности упругой характеристики порядка $11,5$ % [6, 16, 17, 19, 21].

6. Для применения в информационно-измерительных системах и электрофизических установках разработан, изготовлен и испытан опытный образец датчика избыточного давления с микроэлектронным преобразователем Холла. Показатели датчика: диапазон измерений давления газов и жидкостей (в т.ч. агрессивных) 1 Па \div 25 кПа; выходной сигнал – двухпроводная линия $4 - 20$ мА; основная погрешность не более $0,5$ %; диапазон рабочих температур минус $10 \div$ плюс 50 °С; исполнение коррозионно-стойкое; ориентировочная себестоимость при мелкосерийном производстве 94300 рублей. По техническим

характеристикам датчик соответствует уровню импортных аналогов, но дешевле их. Датчик внедрен в систему водоснабжения солодовенного участка УП «Полоцкий пивоваренный завод» [12, 20].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Учебное пособие для вузов

1. Бейлина Р.А., Грозберг Ю.Г., Довгяло Д.А. Микроэлектронные датчики: Учеб. пособие для вузов. – Новополоцк: ПГУ, 2001.– 308 с.

Статьи

2. Довгяло Д.А. Применение гальваномагнитных преобразователей в датчиках давления // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–25 сент. 1998 г. / Белорус. гос. технологич. ун-т.– Минск, 1998.– С. 29–30.

3. Довгяло Д.А. Магнитные системы датчиков давления, построенных на основе микроэлектронного преобразователя Холла // Материалы 53-й междунар. науч.-техн. конф. профессоров, преподавателей, научных работников и аспирантов Белорус. гос. политехн. академии, Минск, 2–6 февр. 1999 г. / Белорус. гос. политехн. акад.– Минск, 1999.– Ч. 2.– С. 10.

4. Довгяло Д.А. Новые возможности применения преобразователей Холла // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Материалы II респ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Гомель 15–20 марта 1999 г. / Гомельский гос. ун-т.– Гомель, 1999.– Ч. 1.– С. 73.

5. Довгяло Д.А., Демченко А.И., Борисенко В.Е. Анализ магнитных систем холловских датчиков давления и перемещения // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Материалы II респ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Гомель 15–20 марта 1999 г. / Гомельский гос. ун-т.– Гомель, 1999.– Ч. 2.– С. 91–95.

6. Довгяло Д.А., Борисенко В.Е. Датчики быстропеременных давлений с микроэлектронным преобразователем Холла // Радиотехника и электроника. – 1999. – Вып. 24.– С. 190–194.

7. Борисенко В.Е., Грозберг Ю.Г., Тарасов С.А., Довгяло Д.А. Постоянные магниты в датчиках давления с микроэлектронным преобразователем Холла // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники ПЭМ-99: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Таганрог, 6–11 сент. 1999 г. / Таганрогский гос. радиотехнич. ун-т.– Таганрог, 1999.– С. 131.

8. Довгяло Д.А., Грозберг Ю.Г., Тарасов С.А., Демченко А.И. Гальваномагнитные датчики давления // Теория и техника передачи, приема и обработки информации: Сб. науч. трудов по материалам 5-й междунар. конф., Харьков, 27–30 сент. 1999 г. / Харьковский гос. техн. ун-т радиоэлектроники.– Харьков, 1999.– С. 271–273.

9. Довгяло Д.А., Бурдин С.М. Малогабаритные постоянные магниты // Разработка импортозамещающих технологий в химической промышленности: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 20–22 окт. 1999 г. / Белорус. гос. технологич. ун-т.– Минск, 1999.– С. 354–357.

10. Довгяло Д.А. Этапы и перспективы развития гальваномагнитных датчиков / ПГУ.– Новополоцк, 1999.– 12 с.– Деп. в БелИСА 29.11.99.– № Д 1999124 // Реферативный сборник непубликуемых работ.– 2000.– № 4.– С. 103.

11. Довгяло Д.А. Холловские чувствительные элементы и датчики на их основе // Вести Полоцкого гос. ун-та. – Новополоцк, 2000.– Т. 2.– С. 139–142.

12. Довгяло Д.А., Рымарев В.А. Градуировка и определение остаточного напряжения микроэлектронного датчика Холла // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Материалы III респ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Гомель 13–18 марта 2000 г. / Гомельский гос. ун-т.– Гомель, 2000.– Ч. 2.– С. 13–14.

13. Довгяло Д.А., Рымарев В.А. Определение магнитной индукции и градиентов поля в дипольной и квадрупольной системах // НИРС-2000: Материалы респ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Гродно 25–27 апр. 2000 г. / Гродненский гос. ун-т.– Гродно, 2000.– Ч. 4.– С. 114–117.

14. Довгяло Д.А., Рымарев В.А., Бейлина Р.А., Бурдин С.М. К вопросу определения магнитной индукции в зазоре магнитной системы // Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы междунар. науч.-технич. семинара, Новополоцк, 29–31 мая 2000 г. / Полоцкий гос. ун-т.– Новополоцк, 2000.– С. 177–180.

15. Довгяло Д.А., Рымарев В.А., Бейлина Р.А., Бурдин С.М. Определение максимальной магнитной индукции в зазоре дипольной магнитной системы // Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы междунар. науч.-технич. семинара, Новополоцк, 29–31 мая 2000 г. / Полоцкий гос. ун-т.– Новополоцк, 2000.– С. 116–124.

16. Довгяло Д.А., Рымарев В.А. Гофрированная металлическая мембрана с неравномерной гофрировкой // Метрологическое обеспечение качества–2000: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28–30 ноября 2000 г. / Минск: Тесей, 2000.– С. 191–196.

17. Довгяло Д.А., Мильто П.В. Алгоритм расчета гофрированной мембраны с присоединенной массой // Машиностроение: Сб. научн. трудов. / Под ред. И.П. Филонова. – Минск: УП «Технопринт», 2001.– Вып. 17.– С. 425–428.

18. Макаров Д.А., Довгяло Д.А., Рымарев В.А. Разработка программного обеспечения для проектирования дипольных и квадрупольных магнитных систем // Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы II междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 15–17 мая 2002 г. / Полоцкий гос. ун-т.– Новополоцк, 2002.– Т. 2.– С. 218–221.

19. Довгяло Д.А., Барышников А.С., Мильто П.В., Рымарев В.А. Автоматизация проектирования и расчета металлических гофрированных мембран // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: Материалы II междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 15–17 мая 2002 г. / Полоцкий гос. ун-т.– Новополоцк, 2002.– Т. 2.– С. 222–225.

20. Довгяло Д.А. Преобразователи избыточного давления газов и жидкостей // Современные проблемы проектирования и производства радиоэлектронных

средств: Материалы II междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 15–17 мая 2002 г. / Полоцкий гос. ун-т.– Новополоцк, 2002.– Т. 2.– С. 35–40.

21. Довгяло Д.А., Рымарев В.А., Борисенко В.Е., Демченко А.И. Исследование гофрированных металлических мембран с присоединенной массой // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей: Материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск – Нарочь, 30 сент. – 4 окт. 2002 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники.– Минск, 2002.– С. 195–198.

Тезисы докладов

22. Довгяло Д.А. Исследование работы квадрупольной раздвижной магнитной системы на основе малогабаритных закритических магнитов // Фундаментальные и прикладные проблемы физики: Тез. докл. III междунар. науч.-техн. конф., Саранск, 6–8 июня 2001 г. / Под ред. В.К. Свешникова; Мордов. гос. пед. ин-т.– Саранск, 2001.– С. 154.

Патенты и заявки на изобретения и полезные модели

23. Пат. МКИ⁷ G 01 L 9/14. Датчик давления / Довгяло Д.А. (BY) – № 4468; Заявл. 25.06.1998; Оpubл. 30.06.2002 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. камітэт Рэсп. Беларусь.– 2002.– № 2.– С. 153.

24. Пат. на полезную модель МКИ⁷ G 01 L 9/14. Датчик давления / Довгяло Д.А., Бурдин С.М., Рымарев В.А. (BY) – № 230; Заявл. 01.06.2000; Оpubл. 30.03.2001 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. камітэт Рэсп. Беларусь.– 2001.– № 1.– С. 162–163.

25. Пат. на полезную модель МКИ⁷ G 01 L 9/14. Датчик давления / Довгяло Д.А. (BY) – № 536; Заявл. 01.06.2001; Оpubл. 30.06.2002 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. камітэт Рэсп. Беларусь.– 2002.– № 2.– С. 202.

26. Заявка МКИ⁷ G 01 L 9/14 Датчик давления / Довгяло Д.А., Бурдин С.М., Капралов М.Е., Грозберг Ю.Г., Демченко А.И. (BY) – № а 19990729; Заявл. 21.07.1999; Оpubл. 30.03.2001 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. камітэт Рэсп. Беларусь.– 2001.– № 1.– С. 47–48.

РЭЗЮМЭ

Даўгяла Дзмітрый Аляксандравіч, Электрычная рэгістрацыя ціску газаў і вадкасцей з выкарыстаннем мікраэлектронных пераўтваральнікаў Хола

Ключавыя словы: датчык ціску, мікраэлектронны пераўтваральнік Хола, магнітная сістэма, металічная гафрыраваная мембрана.

Распрацаваны прынцып пераўтварэння ціску газаў і вадкасцей у электрычны сігнал з выкарыстаннем гальванамагнітных элементаў. Паказана, што мінімальна дастатковай і неабходнай для практычнай рэалізацыі пераўтваральнага блоку датчыка ціску з'яўляецца структура, якая складаецца з пругкага адчувальнага элемента, магнітнай сістэмы і непасрэдна рэгістратара магнітнага поля – мікраэлектроннага пераўтваральніка Хола.

Распрацаваны навукова абгрунтаваныя рэкамендацыі, матэматычныя мадэлі, алгарытм і пакет праграмага забяспячэння, якія дазваляюць скараціць матэрыяльныя і часовыя затраты пры падліках і праектаванні малагабарытных дыпольных, квадрупольных і квадрупольных рассоўных магнітных сістэм. Устаноўлена, што для адэкватнага мадэлявання іх працы па метаду адносін дастаткова ўлічваць размерныя суадносіны элементаў, якія складаюць магнітную сістэму і энэргетычныя характарыстыкі магніта.

Распрацаваны матэматычныя мадэлі, алгарытм і праграмны комплекс, якія дазваляюць на этапе праектавання праводзіць мадэляванне працы металічных мембранных пругкіх адчувальных элементаў з раўнамерным і нераўнамерным гофрам, з масай, далучанай да жосткага цэнтру, якія ўлічваюць спосабы ўстаноўкі мембраны ў корпус датчыка (хібнасць разлікаў залежнасцей прагінаў ад ціску не перабольшвае 1,5 %). Паказана, што выкарыстанне нераўнамернай гафрыроўкі металічных мембран і ўлік яе ўплыву ў метадазе накладання з дапамогай трыганаметрычных функцый, якія апісваюць профіль, дазваляе праектаваць пругкія характарыстыкі з раней заданымі лінейнасцю, адчувальнасцю да ціску, дынамічным дыяпазонам.

Распрацавана канструкцыя датчыка залішняга ціску газаў і вадкасцей (у тым ліку і агрэсіўных асяроддзяў) на дыяпазон ціску 1 Па÷25 кПа, складаючаяся з мікраэлектроннага пераўтваральніка Хола ХГ-01 (GaAs), малагабарытных пастаянных магнітаў (SmCo_5) і гафрыраванай металічнай мембраны з матэрыяла 36НХТЮ; спраектаваны другасны электронны пераўтваральнік, зроблен вопытны ўзор датчыка, праведзены яго даследаванні і комплексныя іспыты.

Паказана, што ў вопытным ўзору асноўная хібнасць не перавышае 0,5 % і за кошт пераўтварэння пры ўдзеле магнітнага поля забяспечваецца высокая адчувальнасць да ціску (змены выхаднога сігналу адбываюцца пры змене ўваходнай велічыні на 0,004÷0,02 %).

Распрацаваныя праграма і метадыка выпрабаванняў датчыка залішняга ціску могуць быць выкарастаны пры складанні праграм, метадык іспытаў і паверак датчыкаў рознасці і залішняга ціску.

РЕЗЮМЕ

Довгяло Дмитрий Александрович, Электрическая регистрация давления газов и жидкостей с использованием микроэлектронных преобразователей Холла

Ключевые слова: датчик давления, микроэлектронный преобразователь Холла, магнитная система, металлическая гофрированная мембрана.

Разработан принцип преобразования давления газов и жидкостей в электрический сигнал с использованием гальваномагнитных элементов. Показано, что минимально необходимой и достаточной для практической реализации преобразующего блока датчика давления является структура, состоящая из упругого чувствительного элемента, магнитной системы и непосредственно регистратора магнитного поля – микроэлектронного преобразователя Холла.

Разработаны научно обоснованные рекомендации, математические модели, алгоритм и пакет программного обеспечения, позволяющие сократить материальные и временные затраты при расчете и проектировании малогабаритных дипольных, квадрупольных и квадрупольных раздвижных магнитных систем. Установлено, что для адекватного моделирования их работы по методу отношений достаточен учет размерных соотношений составляющих магнитной системы и энергетических характеристик магнита.

Разработаны математическая модель, алгоритм и программный комплекс, позволяющие на этапе проектирования проводить моделирование работы металлических мембранных упругих чувствительных элементов с равномерным и неравномерным гофром, с массой, присоединенной к жесткому центру, и учитывающие способы установки мембраны в корпус датчика (погрешности расчетов зависимостей прогибов от давления не превышают 1,5 %). Показано, что применение неравномерной гофрировки металлических мембран и учет ее влияния в методе наложения с помощью тригонометрических функций, описывающих профиль, позволяет проектировать упругие характеристики с заданными линейностью, чувствительностью к давлению, динамическим диапазоном.

На основе микроэлектронного преобразователя Холла ХГ-01 (GaAs), малогабаритных постоянных магнитов (SmCo_5) и гофрированной металлической мембраны из материала 36НХТЮ разработана конструкция датчика избыточного давления газов и жидкостей (в том числе агрессивных сред) на диапазон давлений 1 Па÷25 кПа, спроектирован вторичный электронный преобразователь, изготовлен опытный образец датчика, проведены его исследования и комплексные испытания. Показано, что в опытном образце основная погрешность не превышает 0,5 % и за счет преобразования посредством магнитного поля обеспечивается высокая чувствительность к давлению (изменение выходного сигнала происходит при изменении входной величины на 0,004÷0,02 %).

Разработанные программа и методика испытаний датчика избыточного давления могут использоваться при составлении программ, методик испытаний и проверок датчиков разности и избыточного давления.

SUMMARY

Dovghialo Dmitry Alexandrovich, Electrical registration pressure of gases and liquids with a use of microelectronic Hall converters

Key words: pressure transducer, microelectronic Hall converter, magnet system, metallic corrugated diaphragm.

The principle of pressure conversion of gases and liquids into an electrical signal with the use of galvano-magnetic elements has been designed. It has been shown that the device consisting of an elastic sensitive element, magnet system and detector of a magnetic field - microelectronic Hall converter is minimally indispensable and sufficient for practical use in the conversing unit of the pressure sensor.

The recommendations, algorithm, mathematical models and software allowing to reduce material and time costs of calculation and designing of small-sized dipole, quadrupole and quadrupole moving apart magnet systems have been designed. It has been established that taking into account the dimensional ratio of a component magnet system and power characteristics of a magnet is sufficient for adequate modeling of their operation by the method of relations.

The mathematical model, algorithm and software that have been designed allow to model the metallic membrane elastic elements with a regular and irregular corrugations, with weight, added to rigid centre, and to take into account methods of diaphragm in to the construction of the sensor (function of deflection to pressure calculations inaccuracy does not exceed 1,5 %). It has been shown that the application of irregular corrugation of metallic diaphragms and registration of its influence by the method of superposition with the use of trigonometrical functions describing the profile of diaphragms, allows to design the elastic characteristics with a given linearity, pressure sensitivity, dynamic range.

The design of the sensor of gases and liquids (including aggressive environments) overpressure on range 1 Pa÷25 kPa has been projected on the basis of the microelectronic Hall converter "XГ-01" (GaAs), small-size permanent magnets (SmCo₅) and corrugated metallic diaphragm from material "36HXTiO"; the secondary electronic converter has been projected; a sample pressure sensor has been manufactured; tested. It has been shown that the inaccuracy of the pressure measurements do not exceed 0,5 % and the use of the magnetic field allows to reach high sensitivity to pressure (change of an output signal takes place at change of input value by 0,004÷0,02 %).

The designed methods of designer tests of the overpressure sensor can be used at compiling the programs, testing techniques and verifying calibration pressure difference and overpressure.

ДОВГЯЛО ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ХОЛЛА

01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 29. 10. 2002. Формат 60x84 1/16. Бумага офисная.
Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,39 Уч.-изд. л. 1,27 Тираж 100 Заказ №

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»
ЛВ 317 от 22 июля 1998 г.

211440, г. Новополоцк, ул. Блохина, 29