

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Е.В. Андрианова,
ассистент каф. физики,
П.Н. Жуковский,
студент 2 курса,
БГУИР,
г. Минск, Республика Беларусь*

К ОПЫТУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В КУРСЕ ФИЗИКИ В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Аннотация: рассмотрено современное применение магнитных датчиков Холла в гидравлике, автомобилестроении, микроэлектронике. Описан ранее применявшийся в СССР измеритель большой импульсной проходящей мощности СВЧ в волноводном тракте, использовавший датчик Холла. Предложено использование вышеприведённого иллюстративного материала в лабораторной работе «Эффект Холла».

Ключевые слова: магнетометр, датчик Холла, магнитная индукция, ЭДС Холла, гистерезис, инновационное развитие.

Американский физик Эдвин Холл (1855 – 1938 гг.) обнаружил в 1879 г. возникновение дополнительного электрического поля в датчике (в полоске золотой фольги), проводящем постоянный (основной) электрический ток и размещённом во внешнем магнитном поле. После прекращения действия магнитного поля дополнительное электрическое поле не генерируется. Эффект Холла описывает действие силы Лоренца F_L на движущиеся в магнитном поле заряженные частицы (1).

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}) + q\vec{E}, \quad (1)$$

где \vec{F}_L – сила Лоренца (Н);

q – электрический заряд (Кл);
 \vec{E} – внешнее электрическое поле (В/м);
 \vec{v} – скорость (м/с);
 \vec{B} – магнитное поле (Тл).

Эффект Холла используется в одноимённых датчиках. Для изготовления датчиков Холла используются полупроводники (Ge, Si и др.). Датчики Холла используются для бесконтактного измерения магнитных свойств поля, а также для определения перемещения объекта.

Из опыта работы с молодежью – интерес к изучению учебных тем усиливается при использовании практических примеров мотивирующих будущих инженеров к изучению предмета физики. Лабораторная работа «Эффект Холла» (рис. 1) [1] сопровождается нижеописанным иллюстративным материалом приборов и элементов, работающих на использовании эффекта Холла.



Рисунок 1 – Оборудование лабораторной работы по изучению эффекта Холла на кафедре Физики БГУИР

Конкурентные преимущества датчиков Холла: малые габариты, низкое энергопотребление, высокая чувствительность, широкий частотный диапазон, отсутствие подвижных частей, способность работать при низких температурах, в запыленных и загрязненных условиях. Датчик Холла по сравнению с другими датчиками имеет уникальную

особенность: выходной эффект определяется произведением входных эффектов. На выводах датчика, помещённого в поле электромагнитного излучения, появляется выходное низкочастотное (постоянное) напряжение с пропорциональной зависимостью от произведения двух входных величин (амплитуд электрического и магнитного компонентов электромагнитной волны).

Малая площадь поверхности (минимальные размеры кристаллических датчиков Холла $0,7 \times 0,7 \text{ мм}^2$, а плёночных $10 \times 10 \text{ мкм}^2$), позволяет приборам производить измерение в глубоких отверстиях малого диаметра. Малая толщина (у кристаллических датчиков Холла вместе с корпусом порядка 1 мм, а у плёночных вместе с подложкой порядка 0,1 мм), позволяет выполнять приборам измерения в очень малых зазорах. Датчик Холла реагирует на постоянные, переменные или импульсные управляющие поля (токи) появлением соответствующего напряжения или тока на выходе. Это даёт возможность детектировать, модулировать и затем получать на выходе сигналы соответствующей формы и мощности, т.е. преобразовывать измеряемые сигналы. В генераторе синусоидальных колебаний инфранизких частот датчик Холла выполнен подвижным элементом.

К числу главных недостатков датчиков Холла относятся: зависимость сопротивления и коэффициента Холла от температуры, от магнитного поля; наличие остаточного напряжения, в том числе резистивного и термического, а также напряжения, наводимого в выводах переменными полями. Эти недостатки устраняются выбором соответствующей электрической схемы прибора, систем компенсации и т. п.

Магнитометр ("тесламетр" и "гауссметр" по наименованию единицы измеряемой величины) – прибор для измерения модуля полного вектора магнитной индукции или его составляющих (рис. 2). Гальваномагнитный магнитометр использует эффекта Холла или магниторезистивный, магнитоконцентрационный и магнитодиодный эффекты. Наиболее популярны при измерении магнитной индукции постоянных, переменных и импульсных полей магнитометры с измерительным преобразователем (ИП) на основе эффекта

Холла [2], обладающие линейной зависимостью возникающего электрического поля от магнитного поля в широком диапазоне его значений и чувствительностью $\sim 10^{-7}$ - 10^{-6} Тл. Тесламетры Холла применяются для контроля магнитных систем электроизмерительных и электронных приборов; для измерения магнитной индукции в зазорах электродвигателей, генераторов, в электромагнитных реле; для измерения и анализа полей рассеяния источников постоянных, переменных и импульсных магнитных полей.

Более современным типом преобразователей магнитного поля, основанном на эффекте Холла являются, т.н. магниточувствительные интегральные микросхемы (МЧИМС) (рис. 3). В приборах этого класса объединены: преобразователь магнитного поля, усилитель сигнала и стабилизатор напряжения питания. Датчики Холла работают в составе аналоговых и цифровых измерителей.

Первая группа интегральных датчиков Холла – это линейные устройства, применяющиеся в измерителях напряжённости магнитного поля. Эти устройства содержат схемы усиления сигнала датчика.

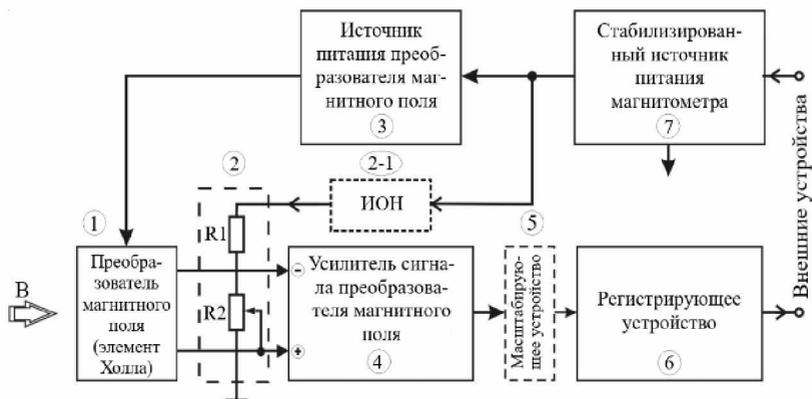


Рисунок 2 – Структурная схема магнитометра

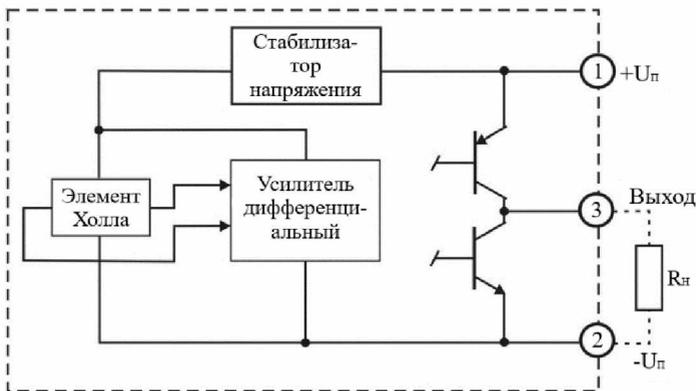


Рисунок 3 – Структурная схема магнитометра магниточувствительной интегральной схемы

Необходимая предварительная обработка сигнала обычно заключается в усилении и температурной компенсации. Может понадобиться также стабилизация питающего напряжения. При отсутствии магнитного поля выходное напряжение датчика должно быть равно нулю, поэтому требуется дифференциальный усилитель [2].

Аналоговый датчик (элемент Холла) (рис. 4) преобразует магнитную индукцию напрямую в напряжение, определяющее видимую индикацию.

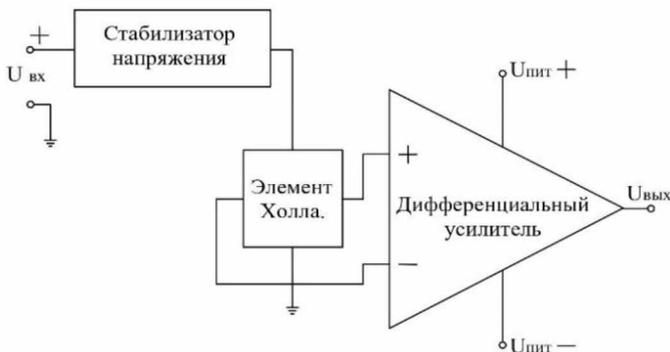


Рисунок 4 – Внутренняя схема ИМС линейного датчика Холла

Данные измерительные преобразователи могут использоваться в следующих устройствах (датчики тока; приводы переменной частоты вращения; схемы управления и защиты электродвигателей; датчики положения; датчики расхода; бесколлекторные двигатели постоянного тока; бесконтактные потенциометры; датчики угла поворота; детекторы ферромагнитных тел; датчики вибрации; тахометры).

Линейные датчики Холла могут быть использованы в составе измерителей силы тока в пределах от 250 мА до тысяч ампер. Важнейшим достоинством таких датчиков является полное отсутствие электрической связи с измеряемой цепью. Линейные датчики позволяют измерять постоянные и переменные токи, в том числе токи довольно высокой частоты. Если линейный датчик Холла расположен вблизи проводника с током, то выходное напряжение датчика пропорционально индукции магнитного поля, окружающего проводник. Величина индукции, в свою очередь, пропорциональна току. В простейшем случае датчик тока представляет собой конструкцию, в которой датчик Холла устанавливается около провода, по которому течёт измеряемый ток.

Такие датчики используются для измерения больших токов, особенно в линиях электропередач. Индукция B определяется по формуле (2):

$$B=2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{r}, \quad (2)$$

где r – расстояние от центра чувствительной области датчика до оси симметрии проводника (м);

I – сила тока, протекающего в проводнике в амперах (А).

Чувствительность датчика тока может быть значительно увеличена путём использования концентратора магнитного потока в виде магнитопровода с прорезью, в которую помещается линейный датчик Холла. В этом случае индукция магнитного потока через датчик.

Вторая группа интегральных датчиков Холла включает в

себя микросхемы компараторного типа с логическими уровнями напряжения на выходе (рис. 5). Эта группа более многочисленна в силу большего числа возможных применений.

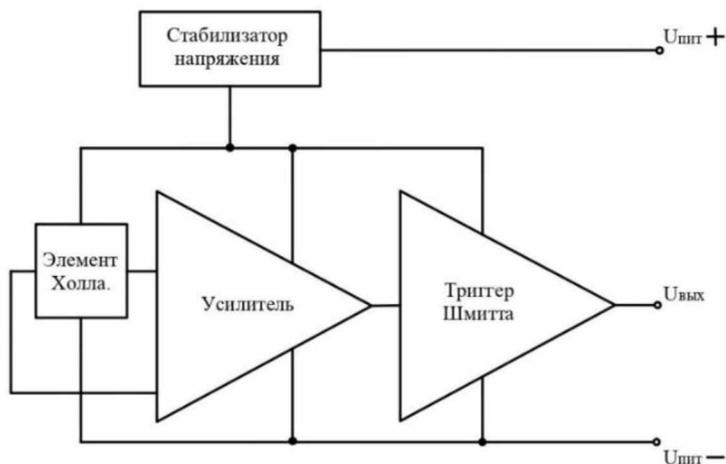


Рисунок 5 – Функциональная схема микросхемы логического датчика Холла (с логическим выходом)

Микросхемы с логическим выходом (рис. 5) делятся на две подгруппы: переключатели и триггеры. Униполярный переключатель срабатывает только при наличии магнитного поля одной полярности и гарантирует выключенное состояние в отсутствие магнитного поля; магнитное поле противоположной полярности не оказывает на него никакого влияния. Биполярный триггер, напротив, реагирует на обе полярности: включается при приближении северного или южного полюсов магнита и выключается только в том случае, если поле с противоположным знаком достигнет определенного уровня. Термин «биполярный переключатель» обычно применяется к триггерам, реагирующим на пропадание поля. Такие переключатели переходят во включенное состояние при наличии магнитного поля, а выключаются при снижении уровня той же полярности, отсутствии поля, или в присутствии поля с противоположным знаком. Омниполярный датчик Холла –

реагирует на любой магнитный полюс. Т.е. любой полюс может включать и выключать датчик. Это может быть, как южный, так и северный полюс.

Цифровой датчик фиксирует напряжением наличие (или отсутствие) магнитного поля и выдаёт сигнал о наличии (или отсутствии) магнитного поля. Цифровой датчик – двухпозиционный («Вкл – Выкл») аналог геркона с механическим контактом. Цифровой датчик Холла бесконтактный.

Логические датчики Холла: датчики частоты вращения; устройства синхронизации; датчики систем зажигания автомобилей; датчики положения (обнаруживают перемещение менее 0,5 мм); счётчики импульсов (принтеры, электроприводы); датчики положения клапанов; датчики блокировки дверей; датчики бесколлекторных двигателей постоянного тока; измерители расхода; бесконтактные реле; детекторы приближения; считыватели магнитных карточек или ключей; датчики бумаги (в принтерах).

Существуют различные методы измерения расхода с использованием цифровых датчиков Холла, но принцип у них, как правило, общий: каждое изменение магнитного потока через датчик соответствует некоторой порции жидкости или газа, прошедшей через трубопровод. Как правило магнитное поле создаётся постоянными магнитами, установленными на лопастях рабочего колеса датчика расходомера. Рабочее колесо вращается потоком воды (газа). Датчик выдаёт два импульса за оборот колеса.

В СССР для измерения большой импульсной проходящей мощности СВЧ в волноводном тракте использовался датчик Холла [3]. Максимально допустимая мощность, передаваемая по волноводу с датчиком, рассчитывалась по нагреву датчика (3).

$$P_{max} = \frac{2Q\Delta T}{d}, \quad (3)$$

где P_{max} – максимально допустимая мощность рассеяния на единицу объёма (Вт/м²);

ΔT – максимально допустимый нагрев датчика (°C);

Q – коэффициент теплоотдачи в воздухе ($\text{Вт} \cdot \text{м}^2 / ^\circ\text{C}$);

d – толщина датчика (мм).

С учётом поглощённой датчиком мощности СВЧ излучения (4).

$$P_n = kP, \quad (4)$$

где P_n – поглощённая датчиком мощность СВЧ излучения;

k – коэффициент преобразования датчика (Вт);

P – мощность СВЧ, передаваемая по волноводному тракту (Вт).

Удобство бесконтактного срабатывания, простота использования делают их незаменимыми в приборостроении и других отраслях промышленности. Интегральные датчики Холла производят такие фирмы, как Honeywell, Melexis, Allegro Microsystems и др.

Датчик Холла в автомобилях используется в прерывателе (трамблере) бесконтактной системы зажигания (с начала XX века), в системе ABS (с конца XX века). Автомобильный датчик Холла, применяемый для контроля и обеспечения работы системы зажигания автомобиля. Схема его устройства на рис. 6.

Датчик состоит из чувствительного элемента 3 (полупроводниковой пластины датчика Холла) и интегрированного с ним микроконтроллера 1 (микросхемы обработки выходного сигнала с датчика Холла). Как правило автомобильный датчик Холла имеет три контакта (клеммы) для подключения в электрическую цепь (схему) автомобиля. Автомобильный датчик Холла для системы зажигания имеет также постоянный магнит 2, который отделен зазором от чувствительного элемента датчика Холла, и магнитопроводом. Магнитное поле постоянного магнита способно индуцировать выходной сигнал с датчика Холла, а металлические лопасти 4 вращающегося магнитопровода, перекрывая (шунтируя) магнитный поток будут приводить к соответствующему изменению (колебанию) выходного сигнала. Влияние магнита на полупроводниковую пластину через вырезы стального экрана магнитопровода прерывается, поворотом экрана,

расположенном между магнитом и полупроводниковой пластиной. После прекращения действия магнитного поля ток не генерируется. Число вырезов стального экрана равно числу цилиндров двигателя автомобиля. Далее выходной сигнал связан с системой подачи искры зажигания в нужный момент положения коленчатого вала двигателя.

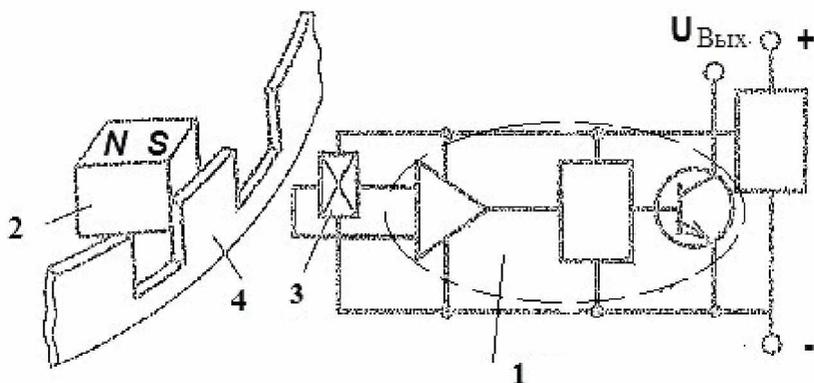


Рисунок 6 – Устройство автомобильного датчика Холла

В двигателе автомобиля датчики Холла определяют положение коленчатого вала (когда поршень первого цилиндра находится в верхней мертвой точке такта сжатия); определяют положение распределительного вала ГРМ (для синхронизации открытия клапанов в газораспределительном механизме двигателя внутреннего сгорания).

На сегодняшний день магнитные датчики Холла широко распространены в современных условиях и применяются не только в специализированных изделиях, но и в обычной бытовой технике. При этом большая часть пользователей даже не подозревает, что те приборы и аппараты, которые они используют ежедневно для решения своих бытовых вопросов, оснащены этими чувствительными элементами. Так, например, датчики Холла имеются в телефоне, в клавиатуре, также они могут быть установлены в транспортных средствах – в автомобиле или мотоцикле. Здесь они применяются в качестве

датчиков движения, скорости, направления.

Устройства, созданные на эффекте Холла, хороши в применении тем, что не восприимчивы к пыли, грязи и воде. Поэтому они широко распространены в производстве и используются в различных датчиках, таких как датчики скорости вращения (велосипедные колеса, зубья шестерен, автомобильные спидометры, электронные системы зажигания), датчики потока жидкости, датчики тока и датчики давления. Обычные приложения часто встречаются там, где требуется прочный и бесконтактный переключатель или потенциометр. К ним относятся электрические пистолеты для страйкбола, триггеры электропневматических ружей для пейнтбола, регуляторы скорости картинга, смартфоны и некоторые системы глобального позиционирования [4].

Поскольку одним из приоритетных направлений развития современного государства является космическая отрасль, широкое применение получили и двигатели на эффекте Холла, которые используются при ракетостроении [5]. Применение Холловских двигателей, например, в СССР началось в 1972 году. А их серийное производство было налажено уже в 1982 году. Наиболее современным из этих двигателей является SPT-140, в 2017 году выведший на целевую орбиту спутник Eutelsat 172В. В том же году на орбиту был запущен спутник с установленным на нем Холловским двигателем нового поколения производства израильской компании «Рафаэль». Спутники Starlink оснащены двигателями, работающими на эффекте Холла с использованием криптона в качестве рабочего тела. Вышеизложенное демонстрирует неразрывную связь физики с успехами инженерии и космическими технологиями.

В современной государственной политике Беларуси высшее образование рассматривается как стратегический ресурс инновационного развития страны. Необходимым условием внедрения инновационно-экономической модели в Республике Беларусь на 2021-2025 годы является наличие специалистов, способных к разработке, адекватному восприятию, технологическому сопровождению и внедрению в практику инновационных идей и разработок.

Использование иллюстративного материала в

методических пособиях способствует усвоению студентами учебных знаний, согласно программе технических ВУЗов.

Список использованных источников и литературы:

[1] Дорошевич И.Л., Иванов М.А., Родин С.В., Смирнова Г.Ф. Электромагнетизм. Волновая и квантовая оптика. Лабораторный практикум. Пособие. – Минск: БГУИР. – С. 112. Свидетельство о государственной регистрации издателя №1/238 от 24.03.2014, №2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014. ЛП №02330/264 от 14.04.2014. 220013, Минск, П. Бровки, 6.

[2] Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – М: ДМК Пресс, 2001. – С. 544.

[3] Антропов В.А., Антропова Л.Х. Применение гальваномагнитных явлений в полупроводниках для создания приборов и устройств СВЧ диапазона. – Пенза: ПГУ, 2011. – С. 166.

[4] Богоявленский Д.М., Вознесенский Д.А. Перспективы дистанционного управления судном через спутниковый канал связи. Сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития системы отраслевого транспортного образования». – Казань, 2020. – С. 16-24.

[5] Железняков А.Б. Космическая деятельность стран мира в 2020 году. Журнал «Инновации» 2020 №11. – М: ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2020. – С. 265.

© *Е.В. Андрианова, П.Н. Жуковский, 2024*