

**АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ, КОНТРОЛЬНЫЕ
И ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА**

УДК 621.317.31

**Л. Я. МУЛЫГИН, В. И. ПОГОДИН,
А. П. ЩЕЛКИН, Г. А. ЮРЬЕВА**

(Ленинград)

**БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ
С ПОМОЩЬЮ ЭФФЕКТА ХОЛЛА**

Острая необходимость в измерении слабых постоянных токов без прерывания электрической цепи приборами или измерительными зондами возникла с развитием ускорительной техники. Так, например, при измерении постоянных токов пучков заряженных частиц в ускорителях прямого действия до последнего времени использовался цилиндр Фарадея. Однако с увеличением энергии частиц и плотности пучков резко возрастает мощность, выделяемая при пересечении пучков зондом, усложняется теплоотвод, и измерительные устройства, содержащие цилиндр Фарадея, становятся слишком сложными и громоздкими. Кроме того, в ряде случаев прерывание пучка само по себе бывает нежелательным. В этих условиях бесконтактное измерение постоянных токов пучков заряженных частиц является не только желательным, но зачастую и единственно возможным методом измерения.

Бесконтактный метод измерения токов может найти также широкое применение при измерении токов внутри кабелей, скорости движения электролитов по трубам и т. д.

Бесконтактное измерение тока сводится, по существу, к измерению магнитной индукции его поля. При этом одним из немаловажных требований, предъявляемых к измерителю, является независимость его показаний (в пределах допустимых погрешностей) от расположения проводника (или пучка заряженных частиц) по отношению к чувствительному элементу. Например, независимость показаний от координат пучка в ионопроводе. Этим требованиям удовлетворяют измерители, в качестве чувствительного элемента которых используются датчики э. д. с. Холла, помещенные в кольцевые концентраторы.

В настоящей статье сообщаются результаты исследования влияния отдельных факторов (материала и формы концентраторов) на порог чувствительности холловских измерителей токов, а также приводится описание конструкции датчиков Холла, предназначенных для помещения в концентратор, и конкретных схем измерителей.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ И МАТЕРИАЛА КОНЦЕНТРАТОРА

Конструктивно бесконтактный измеритель токов представляет собой тороидальный концентратор, охватывающий провод с измеряемым то-

ком или пучок заряженных частиц, в диаметрально расположенных зазорах которого размещаются один или несколько датчиков Холла [1]. Чувствительность такого измерительного устройства в значительной степени зависит от правильного выбора размеров и материала концентратора. Для доказательства этого выразим чувствительность датчика Холла к току S_i через параметры датчика и концентратора

$$S_i = \frac{e_x}{i}, \quad (1)$$

где

$$e_x \cong R_x I_n B \text{ — э.д.с. Холла;} \quad (2)$$

R_x — постоянная Холла; I_n — ток питания датчика Холла; B — индукция в зазоре;

$$B = \mu_r H, \quad (3)$$

$$H = \frac{i}{\pi D}, \quad (4)$$

где μ_r — магнитная проницаемость тела концентратора; H — напряженность поля, создаваемая измеряемым током i ; D — длина средней линии концентратора. Подставляя (2) в (1) с учетом (3) и (4), получим

$$S_i = k \frac{\mu_r}{D}, \quad (5)$$

где $k = \frac{1}{\pi} R_x I_n$. Как известно [2], магнитная проницаемость тела концентратора кольцевой или тороидальной формы, имеющего зазор, может быть определена по формуле

$$\mu_r = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{d}{\pi D}}. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5), найдем окончательное выражение для чувствительности к току датчика Холла, помещенного в кольцевой или тороидальный концентратор:

$$S_i = k \frac{\frac{1}{D}}{\frac{1}{\mu} + \frac{d}{\pi D}}. \quad (7)$$

Анализируя выражение (7), можно сделать следующие выводы:

- 1) при очень малых зазорах, когда $\frac{d}{\pi D} \ll \frac{1}{\mu}$ $S_i = k \frac{\mu}{D}$;
- 2) при очень больших μ , когда $\frac{1}{\mu} \ll \frac{d}{\pi D}$, чувствительность измерительного устройства практически не зависит от диаметра концентратора и определяется шириной зазора. Очевидно, что при $\mu \rightarrow \infty$ $S_i \rightarrow S_{i \max} = k \frac{\pi}{d}$. Найдем отношение

$$\frac{S_i}{S_{i \max}} = \frac{1}{1 + \frac{\pi D}{\mu D}},$$

откуда магнитная проницаемость вещества, требуемая для обеспечения

принятого отношения $\frac{S_i}{S_{i\max}}$ при заданных ширине зазора d и диаметре концентратора D , равна

$$\mu = \frac{\pi D}{d} \frac{1}{\frac{S_i}{S_{i\max}} - 1}.$$

На рис. 1 показано семейство кривых $\mu = f\left(\frac{S_i}{S_{i\max}}\right)$, где отношение $\frac{\pi D}{d}$ взято в качестве параметра. Пользуясь этими графиками и зная отношение $\frac{\pi D}{d}$, можно определить минимальное значение μ , при котором $\frac{S_i}{S_{i\max}}$ составит желаемую величину. Например, при $D=70$ мм, $d=0,1$ мм, считая $\frac{S_i}{S_{i\max}} = 0,75$, найдем $\mu \geq 3000$. Выбор материала концентратора с магнитной проницаемостью выше 3000 не приводит к заметному увеличению S_i .

Для существенного увеличения чувствительности устройства путем выбора материала с более высокой магнитной проницаемостью необходимо увеличить $S_{i\max}$. Сделать это за счет уменьшения ширины зазора d , как правило, не удастся, поскольку упомянутая величина ограничена толщиной датчика Холла, которая, естественно, уменьшена быть не может. Учитывая это, было предложено выполнять концентратор в виде спирали с замкнутыми концами [3].

Нетрудно показать, что магнитная проницаемость тела такого концентратора определяется выражением

$$\mu_r = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + \frac{n\pi D}{d}},$$

где n — число витков спирали; $S_{i\max} = k \frac{n\pi}{d}$, т. е. в n раз выше, чем максимальное значение чувствительности устройства, содержащего обычный тороидальный или кольцевой концентратор.

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДАТЧИКА ХОЛЛА

Как правило, требуемое значение μ может быть обеспечено концентраторами, изготовленными из феррита или пермаллоя. Однако применение пермаллоя связано с рядом технологических трудностей. Хорошая электропроводность пермаллоя не позволяет осуществить непосредственную приклейку полупроводниковой пластины датчика Холла к телу концентратора, применение же изолирующего слоя приводит к увеличению зазора и уменьшению чувствительности устройства.

Таким образом, с точки зрения технологии, наилучшим материалом концентратора является феррит. Он обладает достаточно высоким электрическим сопротивлением, что позволяет непосредственно наклеивать датчик Холла на концентратор, хорошо шлифуется и не теряет свои свойства от механических напряжений. Тем не менее в некоторых слу-

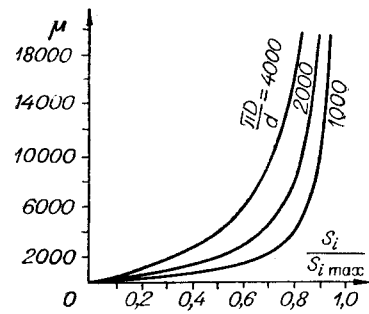


Рис. 1.

чаях, когда толщина зазора может быть доведена до нескольких десятков микрон, как было видно из выведенных формул, пермаллоевый концентратор может дать заметный выигрыш в чувствительности.

Для того чтобы избежать увеличения зазора за счет изолирующего слоя, была разработана так называемая «магнитная головка», которая

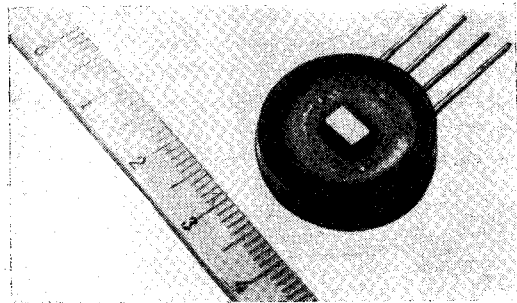


Рис. 2.

может быть помещена в концентратор любой формы. Общий вид «магнитной головки» показан на рис. 2. Датчик э. д. с. Холла из антимионда индия наклеен на плоскопараллельную тщательно отшлифованную ферритовую подложку и закрыт сверху также плоскопараллельной ферритовой пластиной, размеры которой выбраны так, чтобы она не перекрывала холловские и токовые контакты датчика. Все это помещено в эбонитовое кольцо

и залито эпоксидной смолой холодного отверждения. Перед заливкой электроды датчика подпаиваются к специальным выводам.

«Магнитная головка» имеет следующие размеры: диаметр 15 мм; высота 6 мм. Размеры чувствительного элемента — датчика э. д. с. Холла — $4 \times 2 \times 0,01$ мм. Технология изготовления головки позволяет сравнительно легко довести толщину заключенного в ней датчика э. д. с. Холла до 5—10 мкм и тем самым значительно увеличить чувствительность устройства. Для этого полупроводниковая пластина шлифуется с одной стороны и наклеивается с помощью эпоксидного клея (толщина приклеивающего слоя 1—2 мкм) на плоскопараллельную ферритовую подложку, которая, в свою очередь, приклеивается с боков клеем БФ-2 к пуансону притирочного устройства. При шлифовке в притирочном устройстве толщина полупроводниковой пластины контролируется с помощью микроскопа. Остальные операции по изготовлению тонкого кристаллического датчика Холла описаны в работе [4].

Для изготовления датчиков Холла был использован антимионд индия с концентрацией примесей $1,5 \cdot 10^{17}$ см⁻³, соответствующей нулевому температурному коэффициенту электропроводности при комнатной температуре. Датчики Холла, изготовленные из антимионда индия с такой концентрацией, как известно [5], обладают минимальным температурным дрейфом нулевого сигнала. Разработанные «магнитные головки» имеют следующие параметры: входное сопротивление 1,5—2 ом; допустимая рассеиваемая мощность 0,1 вт; допустимый ток питания 230—280 мА; чувствительность к полю при допустимом токе питания 260—300 мкв/гс; температурный коэффициент сопротивления не более 0,03 %/°С в интервале температур от -20 до +60°С; температурный коэффициент постоянной Холла не более 0,09 %/°С; температурный дрейф напряжения неэквивалентности не более 1 мкв/°С.

СХЕМА БЕСКОНТАКТНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ТОКОВ

Проведенные исследования, а также разработка специальной конструкции датчиков Холла позволили создать несколько типов весьма чувствительных бесконтактных измерителей токов пучков заряженных частиц.

На рис. 3 изображена блок-схема устройства для измерения постоянных токов пучков заряженных частиц в диапазоне от 10^{-5} до $1,0$ а. Устройство состоит из концентратора — ферритового кольца, разрезанного по диаметру, и двух «магнитных головок» с датчиками э. д. с. Холла, размещенных между полукольцами. Размеры ферритового кольца выбираются такими, чтобы оно могло быть надето снаружи ионопровода, выполненного из немагнитного материала.

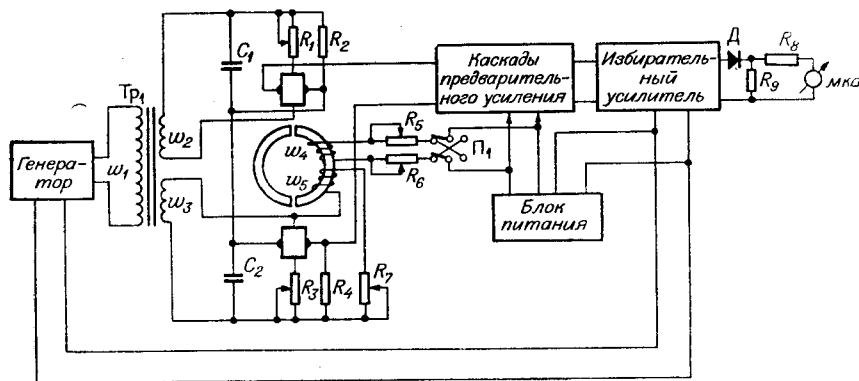


Рис. 3.

Датчики питаются от кварцевого генератора стабильной частоты и амплитуды через трансформатор Tr_1 и балластные сопротивления R_1 и R_3 , которые обеспечивают стабильность тока питания при изменении входного сопротивления датчиков Холла. Сопротивления R_2 и R_4 и конденсаторы C_1 и C_2 предназначены для уравнивания датчика, т. е. компенсации активной и реактивной составляющих напряжения неэквивалентности.

С целью уменьшения температурного дрейфа параметров датчика Холла: нулевого сигнала и постоянной Холла, — датчики вместе с концентратором помещаются в термостат, выполненный в виде медного кожуха, через который циркулирует вода или любая другая жидкость.

Если по каким-либо причинам применение термостатирования оказывается нежелательным, можно скомпенсировать температурный дрейф указанных параметров датчиков Холла другими способами.

Для компенсации температурного дрейфа нулевого сигнала необходимо, изменяя направление тока питания одного из датчиков и поворачивая его при этом на 180° , добиться того, чтобы э. д. с. Холла обоих датчиков складывались, а приращения нулевого сигнала вычитались. Равенства приращений нулевого сигнала с температурой (по абсолютной величине) добиваются, изменяя значения токов питания датчиков посредством сопротивлений R_1 и R_3 .

На кольцевой концентратор намотаны две обмотки: w_4 и w_5 . Обмотка w_4 соединена с блоком питания через сопротивления R_5 , R_6 и переключатель Π_1 . Создаваемый ею поток служит для установки нуля прибора, т. е. для компенсации остаточного значения нулевого сигнала, образующегося (по тем или иным причинам) в результате разбаланса датчиков Холла.

Обмотка w_5 , питаемая от генератора, предназначена для компенсации э. д. с. второй гармоники на выходе датчика Холла, появляющейся

за счет того, что часть поля, создаваемого проводами, подводящими ток питания к датчикам Холла, замыкается по концентратору.

Измерение холловской э. д. с. производится с помощью чувствительного усилителя, состоящего из повышающего входного трансформатора, каскадов предварительного усиления и избирательного усилителя с высокой добротностью.

При измерении переменных токов датчики Холла питаются от источников постоянного тока. Напряжение неэквипотенциальности и его температурный дрейф при этом не имеют значения.

Диапазон величин измеряемых токов ограничивается чувствительностью измерительных приборов и степенью компенсации электромагнитной наводки на датчике и подходящих к нему проводах.

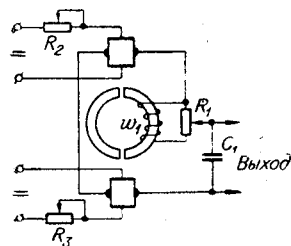


Рис. 4.

Схема измерительного устройства для измерения переменных и импульсных токов приведена на рис. 4. В данном устройстве для повышения чувствительности также используются две «магнитные головки», которые питаются от отдельных источников, а их э. д. с. Холла суммируются. Обмотка w_1 является компенсирующей. Часть напряжения, наводимого в ней, снимается с потенциометра R_1 и складывается в противофазе с напряжением наводки, появляющейся

на холловских электродах. Конденсатор C_1 уменьшает напряжение помех, появляющихся на выходе в результате концентрации внешних высокочастотных полей.

Чувствительность устройства не зависит от частоты измеряемого тока до 20 кГц. Применяя для концентраторов и подложек в «магнитных головках» высокочастотные ферриты, можно существенно расширить частотный диапазон устройства. Это устройство было опробовано для измерения импульсных токов с временем нарастания и спада импульса $t_{\phi 1} = t_{\phi 2} = 1$ мксек и длительностью $t_n = 10$ мксек. Из-за влияния паразитных емкостей и индуктивностей в токовой цепи на фронтах импульса появляются высшие гармонические составляющие, в результате чего фронты импульса на выходе измерительного устройства «размазываются» (рис. 5). Однако при длительностях фронтов в 10—15 мксек влияние паразитных реактивных сопротивлений уменьшается и характер фронтов импульса на входе воспроизводится на выходе. Достоинством такого измерителя является возможность измерения амплитуды импульсов неограниченной длительности.

Из вышеизложенного следует, что разработанные «магнитные головки» с датчиками Холла позволяют измерять с использованием различных концентраторов постоянные, переменные и импульсные поля в широком динамическом диапазоне.

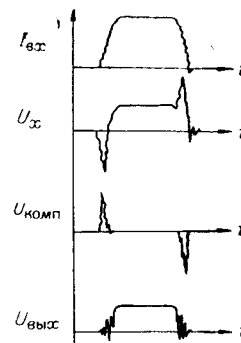


Рис. 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. S. Whitlock, C. Hilsum. Measurement of Ion Beam Current Using a Hall effect Magnetometer.— Nature, 1960, v. 185, № 4709.

2. М. А. Розенблат. Магнитные усилители, ч. 1. М., «Советское радио», 1960.
3. В. Н. Богомолов, В. И. Погодин, А. П. Щелкин. Устройство для бесконтактного измерения токов. Авторское свидетельство № 213972.— ИПОТЗ, 1968, № 11.
4. И. Л. Герловин, В. И. Погодин, Е. П. Фоменко, Г. А. Юрьева. Режим эксплуатации и упрощенная технология изготовления датчиков э. д. с. Холла. М., ГОСИНТИ, 1963.
5. В. И. Погодин, А. П. Щелкин, Г. А. Юрьева. Выбор температуры термостатирования датчиков э. д. с. Холла.— Приборы и системы управления, 1969, № 1.

*Поступила в редакцию
16 мая 1968 г.,
окончательный вариант —
15 мая 1969 г.*