

**С.П. ШАЛАМОВ**, студент, НТУ «ХПИ»

## ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Проведен обзор методов измерения импульсных магнитных полей (ИМП). Описаны принципы действия датчиков ИМП на основе эффектов Холла, Фарадея, магнитосопротивления а также метод с использованием феррозонда Разъяснены особенности применения датчиков ИМП, приведены их преимущества и недостатки. Также рассмотрен метод на основе электромагнитной индукции. Разъяснен принцип конструирования датчика.

**Ключевые слова:** импульсное магнитное поле, эффект Холла, эффект Фарадея, эффект магнитосопротивления, феррозонд, электромагнитная индукция.

**Введение.** В некоторых областях современной науки и техники необходимо проводить измерения амплитудно-временных характеристик ИМП. На сегодня существует несколько основных методов измерения: индукционный метод, метод феррозонда, методы с использованием эффекта Холла, Фарадея, магнитосопротивления.

**Датчик на основе эффекта Холла.** Если пластину, по которой течет ток, поместить в магнитное поле, то в поперечном направлении пластины возникает разность потенциалов. В этом и заключается эффект Холла. Если направление тока, магнитного поля и возникающей разности потенциалов взаимно перпендикулярны, то напряжение равно:

$$U_H = \frac{R_H}{L_H} I_R B = \frac{R_H}{\eta} \frac{L_U}{L_I} U_R B, \quad (1)$$

где  $R_H$  – постоянная Холла;  $I_R$  – ток через пластину;  $B$  – магнитная индукция;  $U_R$  – приложенное к пластине напряжение;  $\eta$  – удельное сопротивление;  $L_U$ ,  $L_I$ ,  $L_H$  – размеры пластины.

Электроды должны располагаться вдоль эквипотенциальных линий чтобы избежать падения потенциала.

Постоянная Холла зависит от свойств материала, из которого изготовлен датчик и концентрации носителей тока.

Напряжение, вызванное эффектом Холла, пропорционально приложенному магнитному полю, поэтому этот эффект может быть использован для измерения магнитного поля.

Физическая основа эффекта Холла заключается в следующем. Движение электрических зарядов в проводнике есть электрический ток. Внешнее магнитное поле проникает внутрь проводника. Следовательно, электроны, двигаясь внутри неподвижного проводника, двигаются и в магнитном поле. На

каждый из них будет действовать сила в направлении, перпендикулярном магнитному полю, и направлению движения. Сила тем больше, чем больше магнитное поле и чем больше их скорость. Связь между этими величинами задается выражением:

$$F = \frac{e}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{H}], \quad (2)$$

где  $e$  – заряд электрона;  $c$  – скорость света.

Причиной движения электронов вдоль проводника является сила, определяемая напряжением, приложенным к проводнику. Это напряжение создает внутри проводника электрическое поле, под воздействием которого двигаются электроны. Суммарная сила, действующая на заряд в электрическом и магнитном полях называется силой Лоренца. Выражение (2) является только частью этой силы, связанной с магнитным полем. Сила Лоренца действует под углом 90 градусов относительно направления тока. Электроны прижимаются к краю проводника. Если у одного из краев проводника образуется их скопление, возникнет разница потенциалов. Электроны отклоняются в направлении силы до тех пор, пока их скопление не станет отталкивать новые с силой, равной по величине силе Лоренца, то есть сила Лоренца уравновесится электрическим отталкиванием:

$$eE = \frac{e}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{H}]. \quad (3)$$

Техническое использование эффекта Холла усложняется поиском веществ, в которых электроны могут двигаться с большими скоростями. Приложенное к телу напряжение определяет скорость движения электронов. Для того, чтобы к телу можно было приложить большое напряжение, необходимо, чтобы его сопротивление было как можно выше. Поэтому оптимальным вариантом является материал с большим сопротивлением и большой подвижностью носителей заряда. Этим требованиям соответствуют некоторые виды полупроводников.

Коэффициентом передачи датчика Холла является отношение полученного напряжения к приложенному при определенной геометрии проводящего тела и может быть определено:

$$\frac{U_H}{U_R} = \frac{\mu H}{cL_1/L_U}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – подвижность носителей заряда;  $U_H$  – электродвижущая сила Холла;  $U_R$  – ЭДС, приложенная к пластине.

Основными недостатками, препятствующими применению данного метода для ИМП, являются следующие: слабая помехозащищенность, недостаточный амплитудный и частотный диапазон, сильная зависимость константы Холла от температуры окружающей среды, необходимость автономного источника питания и вследствие этого громоздкость вспомогательных устройств прибора.

Применяют данный метод для измерения нестационарных магнитных полей с амплитудой от сотен до десятков тысяч А/м и частотой до 200 кГц (при питании постоянным током).

**Метод с использованием эффекта Фарадея.** Метод основан на использовании явления вращения плоскости поляризации плоскополяризованного светового луча, проходящего через некоторые магнитоактивные вещества, помещенные в магнитное поле. Это явление имеет место при распространении света вдоль направления напряженности магнитного поля.

$$\alpha = V \cdot H \cdot l, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – угол поворота плоскости поляризации;  $l$  – длина светового пути в веществе;  $V$  – константа Верде.

Постоянная Верде зависит от природы вещества, его температуры, длины волны света в вакууме и напряженности магнитного поля.

Основными достоинствами данных устройств являются их широкий частотный диапазон (до нескольких ГГц), высокая помехозащищенность всех узлов, так как связь между ними осуществляется световым лучом, возможность передачи информации на большие расстояния.

К недостаткам следует отнести следующее:

1. нижний предел чувствительности при существующих в настоящее время материалах лежит на уровне сотен А/м, что недостаточно для измерения импульсных полей во всем рабочем диапазоне;

2. нелинейная зависимость выходного сигнала измерителя от амплитуды магнитного поля вследствие необходимости применения для выделения полезного сигнала из светового луча поляризационных призм, световой поток на выходе которых изменяется по закону Малюса;

3. необходимость ряда сложных и громоздких вспомогательных устройств, а именно: источника монохроматического света (лазера), фотоприемника (ФЭУ) и т.д.;

4. зависимость константы Верде от температуры.

Однако, невзирая на эти недостатки, данные устройства ввиду их широкополосности и помехозащищенности находят применение для измерения импульсных полей в лабораторных условиях на установках, размещенных в закрытых помещениях.

**Метод магнитосопротивления.** В основе метода лежит эффект Гаусса – изменение электропроводности вещества под действием магнитного поля. Эффект объясняется искривлением траектории движения зарядов.

$$\frac{\Delta R}{R} = A\eta^2 B^2, \quad (6)$$

где  $\frac{\Delta R}{R}$  – относительное изменение сопротивления преобразователя;  $B$  – индукция магнитного поля;  $\eta$  – подвижность носителей заряда;  $A$  – коэффи-

циент, зависящий от размера, формы, материала датчика.

Устройство преобразователя аналогично преобразователю Холла, но напряжение снимается с токовых электродов. Такие преобразователи используются для измерения постоянных или медленно изменяющихся синусоидальных полей.

При измерении ИМП необходимо, чтобы время фронта импульса магнитного поля был намного больше времени диффузии магнитного поля в преобразователь и времени релаксации для рассеяния носителей заряда.

Нагрев, вызванный протеканием основного тока должен быть мал во избежание больших погрешностей. Чаще всего преобразователь включается в одно из плеч моста, который питается источником постоянного напряжения.

При измерении импульсных магнитных полей необходимо измерить сопротивление преобразователя, а затем осуществить пересчет к импульсу магнитного поля так как связь  $B = f(R)$  нелинейна.

Достоинства метода: простота метода малая инерционность.

Недостатки: низкая чувствительность, малый диапазон измерений  $B = 0,5 \dots 3$  Тл, значительная зависимость от температуры, малая помехозащищенность, нелинейная зависимость  $B = f(R)$ .

**Метод феррозонда.** Принцип действия феррозондовых измерителей основан на зависимости магнитной проницаемости сердечника с обмотками, питаемые переменным током, от напряженности измеряемого магнитного поля. Ток в обмотках создает напряженность магнитного поля равное по величине и противоположное по направлению. Индукция в сердечнике будет функционально зависеть от разности:

$$B_1 = f(H_u - H); \quad (7)$$

$$B_2 = f(H_u + H), \quad (8)$$

где  $B_1$  – индукция магнитного поля в первом сердечнике;  $B_2$  – индукция магнитного поля во втором сердечнике;  $H_u$  – измеряемая напряженность магнитного поля;  $H$  – напряженность магнитного поля, создаваемая током в обмотках.

ЭДС, наводимая в измерительной обмотке пропорционально:

$$e = -sw \frac{d(B_1 + B_2)}{dt}, \quad (9)$$

где  $s$  – площадь сердечников;  $w$  – количество витков в измерительной обмотке.

Для измерения синусоидального поля:

$$e(t) = k \cdot \sin 2\Omega t \cdot (H_{um} \sin \omega t). \quad (10)$$

Достоинства метода:

- возможность измерения слабых магнитных полей;
- высокая надежность;
- высокая помехоустойчивость преобразователя.

Недостатки:

- низкая точность;
- малый диапазон измерений ( $H_u$  не более  $10^4$  А/м);
- ограничение по частоте.

**Метод электромагнитной индукции.** Данный метод основан на появлении ЭДС в катушке, вносимой в магнитное поле. Эта ЭДС, пропорциональная производной от измеряемого магнитного поля.

Метод широко применяется при научных исследованиях ввиду своей простоты и надежности, широкого амплитудно-временного диапазона и приемлемой точности. Существует большое количество конструкций датчиков, дискретно перекрывающих диапазон частот от единиц Гц до десятков МГц и диапазон амплитуд от долей мА/м до сотен тысяч А/м.

Существенными достоинствами данного метода являются малый уровень собственных шумов, слабая зависимость метрологических характеристик от климатических факторов, небольшие геометрические размеры. Однако слабая помехозащищенность конструкций служит серьезным препятствием на пути широкого внедрения данных датчиков в практику измерения ИМП.

Индукционный преобразователь (ИП) представляет собой магнитную (рамочную) антенну, помещенную в измеряемое магнитное поле. ЭДС, наводимая в ИП, в соответствии с законом электромагнитной индукции пропорциональна скорости изменения магнитного поля:

$$e_d = -\mu_0 \mu_r s w \frac{dH}{dt} \cos \varphi, \quad (11)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Г/м;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость материала сердечника ИП;  $s$  – площадь рамки ( $m^2$ );  $w$  – количество витков рамки;  $\varphi$  – угол между направлением вектора  $H$  и нормалью к рамке.

Таким образом, максимальная ЭДС наводится в ИП, если  $\varphi = 0$ . На рис. 1 приведена схема замещения ИП.

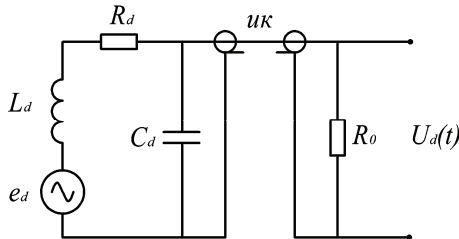


Рисунок 1 – Схема замещения ИП

Дифференциальное уравнение, связывающее эдс  $e_d$  и напряжение на вы-

ходе ИП  $U_d$ , имеет вид:

$$e_d = L_d C_d \frac{d^2 U_d}{dt^2} + \left( \frac{L_d}{R_0} + R_d C_d \right) \frac{dU_d}{dt} + \left( 1 + \frac{R_d}{R_0} \right) U_d, \quad (12)$$

где  $e_d$  – ЭДС, наводимая в ИП;  $L_d$  – индуктивность ИП;  $C_d$  – суммарная паразитная емкость ИП;  $R_d$  – сопротивление ИП;  $R_0$  – входное сопротивление интегратора;  $U_d$  – выходное напряжение ИП.

Передаточная характеристика представляет собой напряжение на выходе ИП  $U_0$  при подаче на его вход единичного скачка напряжения  $1(t)$ . Для ИП, схема замещения которого приведена на рис. 1 :

$$U_0 = \frac{R_0}{R_0 + R_d} \left[ 1 + \frac{1}{P_1 - P_2} (P_2 e^{-P_1 t} - P_1 e^{-P_2 t}) \right], \quad (13)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – корни характеристического уравнения:

$$p^2 + ap + b = 0; \quad (14)$$

$$a = \frac{1}{C_d R_0} + \frac{R_d}{L_d}; \quad (15)$$

$$b = \frac{R_0 + R_d}{C_d L_d R_0}; \quad (16)$$

$$P_{1,2} = -\frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} - b}. \quad (17)$$

При  $a^2/4 > b$  – корни характеристического уравнения будут действительными, а передаточная характеристика – аperiodической или пересогласованной, а при  $a^2/4 = b$  передаточная характеристика будет критически согласованной. Уравнение передаточной характеристики ИП для этого случая имеет вид:

$$U_0 = \frac{R_0}{R_0 + R_d} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{at}{2} \right) e^{-\frac{at}{2}} \right]. \quad (18)$$

Минимальными по степени деформации измеряемого импульса будут ИП с критически согласованной ПХ (при  $a^2/4 < b$  и  $p_1 = p_2$ ).

Параметр  $a = 2/\sqrt{L_n C_n}$  (при  $R_0 \gg R_n$ ) характеризует время нарастания ПХ, определяемое по формуле:

$$T_n^{ПХ} = 3,35 \sqrt{L_n C_n}. \quad (19)$$

Для получения на выходе ИНМП сигнала, пропорционального  $N_0$ , необходимо сигнал с ИП проинтегрировать. Существуют два способа интегрирования:

– с использованием элементов ИП (RL-интегрирование);

– с внешним RC-интегратором.

В первом случае необходимо выполнить условия:

$$L \frac{di_n}{dt} \gg (R_0 + R_n)i_n; C_n \rightarrow 0. \quad (20)$$

При этом:

$$e_n = K_n \frac{dH}{dt} = L_n \frac{di}{dt}, \quad (21)$$

то есть  $i_n \approx H_0$ , а, следовательно,  $U_0 = i_n R_0 \approx H_0$ . Такого рода ИП называют самоинтегрирующимися.

Условия малоискаженного измерения формы импульсов магнитного поля вида  $H = H_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$  можно выразить как:

$$R_0 C_0 \ll \frac{1}{\beta}; \quad T_{И}^c \ll \frac{1}{\alpha}. \quad (22)$$

У несомоинтегрирующих ИП на выход включают RC-цепочку, тогда при выполнении условий:

$$U_{Rи} \gg U_{Cи}; \quad U_{Rи} \gg U_{Lн}; \quad R_{и} \gg R_{н}; \quad C_{п} \rightarrow 0; \quad R_0 \rightarrow \infty; \quad (23)$$

$$i_n = \frac{e_n}{R_n} = \frac{K_n}{R_n} \frac{dH}{dt}; \quad (24)$$

$$U_{Cи} = \frac{1}{C_{и}} \int i_n dt = \frac{K_n}{R_{и} C_{и}}, \quad (25)$$

где  $R_{и} C_{и} = T_{и}^H$  – постоянная интегрирования RC-интегратора.

Коэффициент преобразования ИП обоих видов определяется по формуле

$$K_n^H = \frac{U_d}{H_0} = \frac{\mu_0 \mu_r S w \cdot \cos \varphi}{T_{и}}. \quad (26)$$

Для определения области применения ИНМП с ИП обоих видов необходимо их сравнить по чувствительности и возможности удовлетворения условий (22).

Исходя из приведенных предпосылок можно сделать вывод, что для измерения магнитных полей наносекундного диапазона предпочтительны ИНМП с самоинтегрирующимися ИП, а для измерения магнитных полей микро- и миллисекундного диапазона – ИНМП с RC-интегратором;

Как показывает анализ схемы замещения, параметры несомоинтегрирующих СИ можно оптимизировать. Ниже приведены формулы для расчета оптимального числа витков ИП и диаметра:

$$W_{опт} = 0,3573 \sqrt{\frac{H_m \cdot T_{\phi}^4}{U_0 \cdot T_u \cdot C_d^2}}; \quad (27)$$

$$d_{\text{онт}} = 1,67 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{U_0^2 \cdot T_{\text{и}}^2 \cdot C_{\text{д}}}{T_{\text{ф}}^2 \cdot H_{\text{м}}^2}}, \quad (28)$$

где  $T_{\text{ф}}$  и  $T_{\text{с}}$  – длительности фронта и спада измеряемых импульсов;  $d$  – диаметр ИП;  $U_0$  – напряжение, которое снимается с ИП;  $C_{\text{д}}$  – паразитная емкость ИП, состоящая из емкостей ИП и кабельной линии передачи информации.

**Выводы.** Рассмотрены методы измерения ИМП. Показаны их достоинства и недостатки.

**Список литературы:** 1. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Кнопфель Г. – М. : Мир, 1972. – 392 с. 2. Панин В.В. Измерение импульсных магнитных и электрических полей / Панин В.В., Степанов Б.М. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 120 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Knopfel' G. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja / L Knopfel' G. Moscow: Mir, 1972. 392 s. Print. 2. Panin V.V. Izmerenie impul'snyh magnitnyh i jelektricheskikh polej / Panin V.V., Stepanov B.M. Moscow: Jenergoatomizdat, 1987. 120 s. Print.

*Поступила (received) 02.09.2014*

УДК 519.2

**Вимірювання імпульсних магнітних полів / С.П. Шаламов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 161-168. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.**

Проведено огляд методів вимірювання імпульсних магнітних полів (ІМП). Описані принципи дії датчиків ІМП на основі ефектів Холла, Фарадея, магнітоопору а також метод з використанням феррозонда. Роз'яснено особливості застосування датчиків ІМП, наведено їх переваги та недоліки. Також розглянуто метод на основі електромагнітної індукції. Пояснено принцип конструювання датчика. Розглянуті методи вимірювання ІМП. Показані їх переваги та недоліки.

**Ключові слова:** імпульсне магнітне поле, ефект Холла, ефект Фарадея, ефект магнітоопору, феррозонд, електромагнітна індукція.

УДК 519.2

**Измерение импульсных магнитных полей / С.П. Шаламов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 161-168. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-0740.**

Проведен обзор методов измерения импульсных магнитных полей (ИМП). Описаны принципы действия датчиков ИМП на основе эффектов Холла, Фарадея, магнитосопротивления а также метод с использованием феррозонда. Разъяснены особенности применения датчиков ИМП, приведены их преимущества и недостатки. Также рассмотрен метод на основе электромагнитной индукции. Разъяснен принцип конструирования датчика.

**Ключевые слова:** импульсное магнитное поле, эффект Холла, эффект Фарадея, эффект магнитосопротивления, феррозонд, электромагнитная индукция.

**Measurement of pulsed magnetic fields / S.P. Shalamov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 161-168. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2079-0740.**

A review of methods for measuring pulsed magnetic fields (PMF) is held. The principles of operation of the PMF sensors are described on the basis of Hall's and Faraday's effects, magnetoresistance and terrasond. The features of using PMF are explained, their advantages and disadvantages are shown.



A method based on electromagnetic induction is also discussed. The concept of designing the sensor is explained.

**Keywords:** pulsed magnetic field, Hall's effect, Faraday's effect, magnetoresistance effect, terrasond, electromagnetic induction.