

4917/2-79



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

Я-668

3/12-79

P13 - 12501

Л. Яншак, Ф. Хованец

АНАЛОГОВО-ЦИФРОВОЙ ДЖОУЛЬМЕТР
С ДВОЙНОЙ ИНТЕГРАЦИЕЙ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ
В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТАХ

1979

P13 - 12501

Л.Яншак, Ф.Хованец

АНАЛОГОВО-ЦИФРОВОЙ ДЖОУЛЬМЕТР
С ДВОЙНОЙ ИНТЕГРАЦИЕЙ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ
В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТАХ

Направлено в журнал "Cryogenics"

Яншак Л., Хованец Ф.

P13 - 12501

Аналогово-цифровой джоульметр с двойной интеграцией для измерения потерь на переменном токе в сверхпроводящих магнитах

Излагается метод измерения потерь на переменном токе в сверхпроводящих магнитах. Два сигнала - интеграл скомпенсированного напряжения на магните и производная тока магнита умножаются с помощью датчика Холла. Результат умножения интегрируется и выводится на цифровой вольтметр. Джоульметр, построенный на основе этого метода, измеряет потери энергии за цикл в пределах от 0,1 до 10^3 Дж/цикл.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Jansak L., Chovanec F.

P13 - 12501

An Analog/Digital Double Integration Joulemeter for AC Loss Measurement in Superconducting Magnets

A technique for measuring AC loss in superconducting magnets is described. Two signals, a compensated voltage integral across the magnet and a magnet current differential, are multiplied in a Hall probe multiplier. The results is integrated and digitally displayed. The loss per cycle in a range of $0.1-10^3$ J/s is measured by an electronic joulemeter based on this technique.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

ВВЕДЕНИЕ

Простой метод измерения гистерезисных потерь в сверхпроводящих магнитах был предложен Вильсоном ^{/1/}. Потери за цикл пропорциональны площади гистерезисной петли магнита, которая обычно регистрируется с помощью двухкоординатного самописца. Неточность в определении площади петли и инерция самописца на больших скоростях изменения поля являются главным источником ошибки измерения.

Метод, использующий умножитель на основе датчика Холла и интегратор ^{/2/}, позволяет получить аналоговую величину потерь непосредственно после прохождения цикла, поэтому нет необходимости измерять площадь гистерезисной петли. Но здесь, в отличие от метода по Вильсону, появляются проблемы, связанные с усилением и умножением помех в сигнале из магнита.

В работах ^{/3,4/} приведены несколько измененные схемы измерения по методу ^{/2/}. Различные относительно сложные и дорогостоящие системы с вычислительной машиной и цифровой обработкой сигналов были использованы ^{/5,6/} с целью улучшения вышеупомянутых методов.

Предложенный метод с двойной интеграцией соединяет преимущества как метода по Вильсону, так и методов с умножением на основе датчика Холла и интегратором. Потери на цикл регистрируются в цифровом виде непосредственно после прохождения цикла, проблемы с усилением и умножением помех исключены. Метод можно относительно просто реализовать.

МЕТОД ДВОЙНОЙ ИНТЕГРАЦИИ

Потери энергии на цикл в сверхпроводящем магните, запитываемом импульсами тока треугольной формы с нулевым током в начале и конце цикла, равны:

$$W_1 = \int_0^T u_c \cdot i_c \cdot dt = - \int_0^T (\int u_c dt) \cdot \left(-\frac{di_c}{dt} \right) \cdot dt, \quad /1/$$

где u_c , i_c - мгновенные величины напряжения и тока магнита, T - время цикла.

Правая сторона уравнения /1/ может быть обработана с помощью схемы, показанной на рис. 1. Напряжение на магните с индуктивностью L_c , разделенное делителем на величину $\delta = (R_1 + R_2) / R_2 \approx L_c / M_1$ и скомпенсированное напряжением на взаимной индуктивности M_1 , равным $M_1 \cdot di_c / dt$, приводятся на вход интегратора. Выходной сигнал из интегратора умножается в аналоговом умножителе на сигнал, пропорциональный величине di_c / dt . Этот сигнал получается из вспомогательной взаимной индуктивности, связанной с токовводами так же, как компенсационная катушка. Можно показать, что отношение сигнал/шум обоих входных напряжений умножителя лучше, чем в случае метода, использующего умножитель и один интегратор.

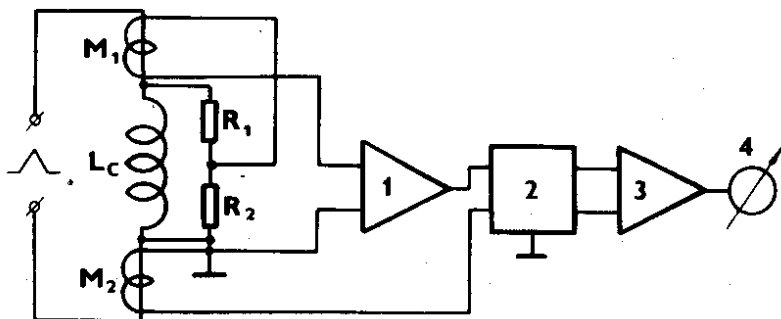


Рис.1. Принципиальная схема метода с двойной интеграцией. 1 - входной интегратор; 2 - умножитель; 3 - выходной интегратор; 4 - цифровой вольтметр.

Выходное напряжение умножителя интегрируется с помощью второго интегратора и выводится за цифровой вольтметр.

Потери на цикл прямо пропорциональны выходному напряжению второго интегратора и могут быть записаны в виде:

$$W_1 = k_W \cdot U_{\text{ВЫХ}} = \delta \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{M_2 \cdot k_M} \cdot U_{\text{ВЫХ}}, \quad /2/$$

где δ - показание делителя, τ_1, τ_2 - интеграционные константы интеграторов, M_2 - вспомогательная взаимная индуктивность, k_M - константа умножителя, равная $k_M = U_{12} / U_1 \cdot U_2$. Здесь U_{12} - выходное и U_1, U_2 - входные напряжения умножителя.

Когда параметры τ_1, τ_2, M_2 и k_M подобраны соответствующим образом, можно получить константу джоульметра в виде 10^n Дж/В, где $n=0,1,2$, т.е. 1; 10; или 100 Дж/В. Это позволяет прямой отсчет величины потерь в цифровом виде.

Зависимость выходного сигнала первого интегратора от сигнала, пропорционального току сверхпроводящего магнита, представляет гистерезисную петлю по Вильсону, форма которой может дать дополнительную информацию^{/1/}.

Поскольку зависимость потерь энергии от выходного сигнала второго интегратора линейная, возможна калибровка в одной точке. Калибровка проводится заменой сверхпроводящего соленоида активным сопротивлением.

АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ДЖОУЛЬМЕТР

На основе приведенного метода с двойной интеграцией был разработан электронный джоульметр, применяемый для испытаний импульсных сверхпроводящих магнитов в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Джоульметр состоит из блока компенсации, входного интегратора, аналогового умножителя, выходного интегратора и цифрового вольтметра. Входной и выходной интеграторы идентичны, их постоянная времени составляет 10 мс, дрейф выходного напряжения - около 0,5 мВ/мин. Умножитель состоит из двух идентичных преобразователей напряжение - ток, малого соленоида и датчика Холла.

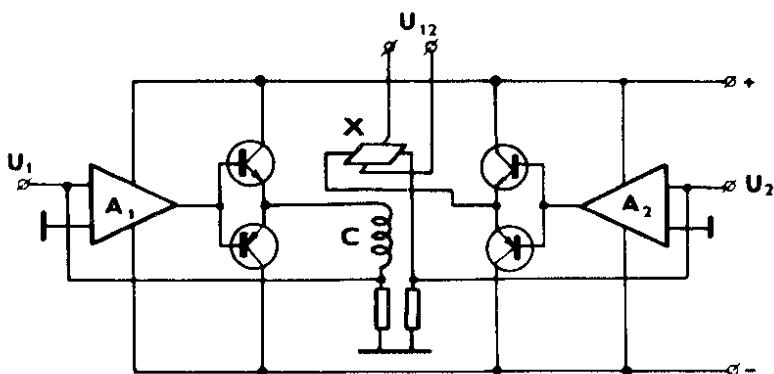


Рис.2. Принципиальная схема аналогового умножителя. $A_1 A_2$ - входные усилители; X - датчик Холла; C - соленоид.

На рис. 2 показана принципиальная схема умножителя. Преобразователь напряжение-ток состоит из входного операционного усилителя и усилителя тока с отрицательной связью. Чувствительность напряжение - ток составляет около 2 A/V . Нулевой дрейф преобразователя лучше, чем 10 мкА/мин , максимальный ток датчика Холла составляет 150 мА , стабильность тока лучше, чем 10^{-4} .

Размеры соленоида были оптимизированы. Соленоид содержит 2000 витков, изготовлен из проволоки диаметром $0,2 \text{ мм}$, его константа составляет около $0,1 \text{ T/A}$. Чувствительность датчика Холла из материала InSb составляет $1 \text{ В/А}\cdot\text{T}$, нулевое напряжение на холловских контактах меньше, чем 5 мкВ при токе 100 мА . Линейность умножителя, определенная в основном линейностью датчика Холла, лучше, чем 1% .

Джоульметр работает в диапазоне $0,1 \div 10^3 \text{ Дж/ч}$. С его помощью измерялись потери в диполях и соленоидах с индуктивностью от 1 мН до 1 Н , запитываемых токами до 3 кА . Скорость изменения магнитного поля менялась от $0,1$ по 8 T/с .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использованием метода с двойной интеграцией возможно получить величину потерь в сверхпроводящем магните в цифровом виде, непосредственно после окончания цикла. Исключаются

проблемы, связанные с усилением и умножением пульсаций и помех, которые появляются при использовании метода с одним интегратором. Джоульметр основан на методике с двойной интеграцией, отличается довольно простой схемой. Достигнутая чувствительность составляла 0,1 Дж/ц.

Данная работа выполнена в рамках сотрудничества ОИЯИ и Электротехнического института САН, Братислава. Авторы выражают сердечную благодарность И.Гласнику, стимулировавшему эту работу, а также А.Г.Зельдовичу и Е.И.Дьячкову, проявлявшим постоянный к ней интерес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wilson M.N. *Cryogenics*, 1973, 13, p.361.
2. Gilbert W.S., Hintz R.E., Voelker F. *UCRL*, 18176, 1968.
3. Алешин В.П., Кругликова К.А., Миронов Э.С. *Труды Радиотехнического института АН СССР*, М., 1973, 15, с. 142.
4. Дубасов В.Г. и др. *ПТЭ*, 1977, № 5, с. 182.
5. Gilbert W.S., Voelker F., Acker R. *LBL*, 1977, p.571.
6. Yamada R., Price M.E. *Adv.Cryog.Eng.*, 1977, 22, 0.376.

*Рукопись поступила в издательский отдел
30 мая 1979 года.*