

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

950/2-81

23/II-81

P13-80-698

Л. Яншак

МЕТОД ДВОЙНОЙ ИНТЕГРАЦИИ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ
В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТАХ

Направлено в "Чехословацкий физический журнал, В"

1980

1. ВВЕДЕНИЕ

Измерение энергетических потерь в сверхпроводящих магнитах для ускорителей проводится обычно калориметрическим^{/1/}, аналоговым^{/2,3/} или цифровым методами^{/4/}.

Проведенный анализ метода двойной интеграции, который объединяет преимущества разных аналоговых методов /причем результат измерения представляется в цифровом виде/ является продолжением ранее опубликованной работы^{/5/}, в которой описан аналогово-цифровой джоульметр для измерения потерь энергии в сверхпроводящих магнитах.

Данные о точности, калибровочной методике, а также спецификация электроники представляют собой полезную информацию для практического использования джоульметра с двойной интеграцией, который вследствие простоты обслуживания, универсальности и помехоустойчивости может быть с успехом применен для испытания сверхпроводящих ускорительных магнитов.

Метод, который описан в дальнейшем, можно также применить для измерения гистерезисных потерь или намагниченности коротких образцов, где площадь гистерезисной петли связана с полезной информацией.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Метод двойной интеграции /МДИ/ основан на модификации уравнения для энергетических потерь

$$W_1 = \int_0^T u_S \cdot i_S \cdot dt, \quad /1/$$

где u_S , i_S - мгновенные величины напряжения и тока сверхпроводящего магнита соответственно, T - продолжительность импульса тока.

Интегрированием по частям получаем:

$$W_1 = [i_S \cdot (\int_0^T u_S \cdot dt)]_0^T - \int_0^T (\int_0^T u_S \cdot dt) \cdot \frac{di_S}{dt} \cdot dt. \quad /2/$$

В случае, когда сверхпроводящий магнит запитан током, величина которого в начале и конце импульса равна нулю, первый член уравнения /2/ равен нулю и

$$W_1 = - \int_0^T (\int u_S \cdot dt) \cdot \frac{di_S}{dt} \cdot dt. \quad /3/$$

Из уравнения /3/ получаем известную формулу Вилсона^{/2/}:

$$W_1 = - \oint (\int u_S \cdot dt) \cdot di_S. \quad /4/$$

В предлагаемом методе двойной интеграции алгоритм уравнения /3/ реализуется электронным способом по схеме, представленной на рис.1.

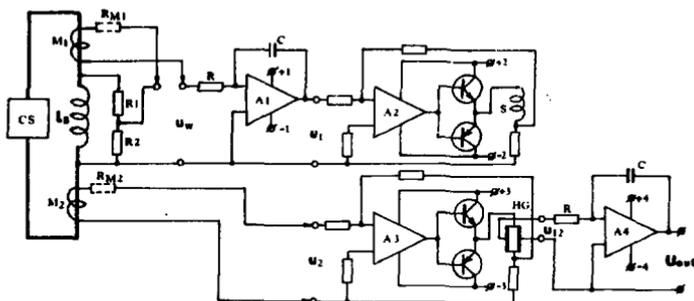


Рис.1. Электрическая схема джоульметра с двойной интеграцией.

Уравнение /3/ можно записать в виде:

$$W_1 = \frac{\tau_1 \cdot \delta}{M_2} \int_0^T u_1 \cdot u_2 \cdot dt, \quad /5/$$

где δ - величина делителя ($\delta = (R_1 + R_2) / R_2$), τ_1 - постоянная времени входного интегратора, M_2 - эффективная взаимная индуктивность вспомогательной катушки, индуктивно связанной с токопроводом, u_1 - выходное напряжение входного интегратора:

$$u_1 = \frac{1}{\delta \cdot \tau_1} \int u_w \cdot dt, \quad /6/$$

где u_w - "напряжение потерь", т.е. напряжение на зажимах магнита со скомпенсированной индуктивной составляющей, u_2 - напряжение, пропорциональное величине di_S/dt :

$$u_2 = -M_2 \cdot \frac{di_S}{dt}. \quad /7/$$

Умножение величин u_1 и u_2 осуществлено с помощью четырех-квadrантного умножителя на основе датчика Холла.

Постоянную умножителя

$$k_m = u_{12} / u_1 \cdot u_2 \quad /8/$$

где u_{12} - выходное напряжение умножителя и u_1, u_2 - входные напряжения, можно представить в виде:

$$k_m = S_H \cdot K_B \cdot A_1 \cdot A_2 \quad /9/$$

где S_H - чувствительность датчика Холла, K_B - константа соленоида умножителя, A_1, A_2 - константы преобразования напряжение-ток.

Выходное напряжение второго интегратора после импульса тока равно

$$U_{OUT} = \frac{1}{r_2} \cdot \int_0^T u_{12} \cdot dt \quad /10/$$

где r_2 - постоянная времени выходного интегратора.

Используя уравнения /5/, /8/, /10/, получаем:

$$W_1 = \frac{\delta \cdot r_1 \cdot r_2}{M_2 \cdot k_m} \cdot U_{OUT} \quad /11/$$

Метод двойной интеграции/МДИ/представляет площадь гистерезисной петли, описанной уравнением /4/, как некую величину напряжения U_{OUT} . Этот метод можно также применить для измерения намагниченности коротких образцов сверхпроводников с помощью измерительных катушек. Можно показать, что постоянную джоульметра на базе МДИ

$$k_w = \frac{\delta \cdot r_1 \cdot r_2}{M_2 \cdot k_m} \quad /12/$$

можно получить, как минимум, на два порядка меньше, чем в случае простого метода умножение - интегрирование /3/. В отдельном случае /с помощью соленоида и датчика Холла, охлаждаемого жидким азотом/ можно получить постоянную джоульметра порядка 10^{-3} Дж/В. Такую высокую чувствительность можно использовать для непосредственного измерения потерь энергии электрическим способом в коротких образцах сверхпроводящих проводов и кабелей. Для измерения потерь энергии в сверхпроводящих импульсных магнитах для ускорителей была использована величина постоянной джоульметра в пределах 10^{-10^3} Дж/В.

Необходимо отметить, что при выводе уравнения /11/ не учитывалось внутреннее сопротивление компенсационной и вспомогательной катушек M_1 и M_2 . В реальном случае величина относительно большого внутреннего сопротивления компенсационной катушки входит в величину сопротивления, которая определяет постоянную времени входного интегратора:

$$r_1 = C \cdot (R + R_{M_1} + R_2), \quad /13/$$

где C , R - емкость и сопротивление интегратора, R_{M_1} - внутреннее сопротивление компенсационной катушки, R_2 - сопротивление части делителя.

Эффективная взаимная индуктивность M_2 равна:

$$M_2 = M_{20} \frac{R_{in}}{R_{M_2} + R_{in}}, \quad /14/$$

где M_{20} - взаимная индуктивность вспомогательной катушки без нагрузки, R_{in} - входное сопротивление преобразователя напряжение-ток, R_{M_2} - внутреннее сопротивление вспомогательной катушки.

Поскольку внутреннее сопротивление датчика Холла по сравнению с входным сопротивлением второго интегратора пренебрежимо мало, постоянная времени выходного интегратора равна:

$$r_2 = C \cdot R. \quad /15/$$

Из уравнения /11/ видно, что подбором величин r_1 , r_2 , M_2 и k_m можно получить постоянную джоульметра в десятичной форме, т.е. 10^n Дж/В ($n=0,1,2,\dots$), что позволяет величину потерь изобразить в цифровом виде, используя для измерения выходного напряжения цифровой вольтметр.

На практике величины r_1 , r_2 и M_2 постоянны, только величина k_m определяется чувствительностями преобразователей напряжение-ток.

Построение схемы умножителя учитывает форму напряжений u_1 и u_2 .

Быстро меняющееся напряжение u_2 , пропорциональное величине di_s/dt , преобразуется в ток датчика Холла с малой постоянной времени /определенной только операционным усилителем и выходными транзисторами/, напряжение u_1 /выходное напряжение входного интегратора/ преобразуется в ток соленоида.

Схема позволяет осуществить гальваническую развязку выхода джоульметра от цепи питания сверхпроводящего магнита, что необходимо в некоторых случаях. Для этого нужно применить четыре изолированных источника питания, как показано на рис.1.

3. ТОЧНОСТЬ МЕТОДА ДВОЙНОЙ ИНТЕГРАЦИИ

Точность джоульметра с двойной интеграцией определяется следующими параметрами:

- а/ дрейфом входного интегратора,
- б/ дрейфом выходного интегратора,
- в/ линейностью и симметричностью умножителя,
- г/ сдвигом фазы в интеграторе и умножителе.

а/ Ошибка из-за дрейфа входного интегратора

Величину ошибки можно представить в виде

$$\Delta W_{11} = \pm I_m \cdot \dot{U}_{d1} \cdot r_1 \cdot \delta \cdot T, \quad /16/$$

где I_m - максимальный ток сверхпроводящего магнита, \dot{U}_{d1} - скорость изменения выходного напряжения входного интегратора из-за дрейфа.

Можно показать, что уравнение /16/ применимо для оценки погрешности метода Вилсона.

б/ Ошибка из-за дрейфа выходного интегратора

Величина ошибки равна:

$$\Delta W_{12} = \pm k_w \cdot \dot{U}_{d2} \cdot T, \quad /17/$$

где \dot{U}_{d2} - дрейф выходного интегратора, k_w - постоянная джоульметра, T - длительность импульса тока.

Знак ошибок ΔW_{11} и ΔW_{12} определяется полярностью напряжения дрейфа.

Из уравнений /16/, /17/ следует, что необходимо обеспечить минимальный дрейф интеграторов.

В таблице приведены погрешности измерения потерь энергии, вычисленные для магнитов типа "оконная рама"^{11/7/}.

Параметры, использованные при вычислении:

$$\begin{array}{ll} I_m = 2000 \text{ А,} & T = 16 \text{ с,} \\ W_1 = 10 \text{ Дж/цикл,} & \delta = 3, \\ r_1 = 10 \text{ мс,} & k_w = 100 \text{ Дж/В.} \end{array}$$

в/ Линейность и симметричность умножителя

Умножитель, который показан как часть схемы на рис.1, состоит из двух преобразователей напряжение-ток, датчика Холла и соленоида без магнитного контура.

Таблица

\dot{U}_d (Vs ⁻¹)	$\Delta W_{11}/W_1$ (%)	$\Delta W_{12}/W_1$ (%)
10 ⁻⁵	0,048	0,16
10 ⁻⁴	0,48	1,6
10 ⁻³	4,8	16,0

Линейность множителя определяется главным образом линейностью датчика Холла, которая зависит от тока датчика /вследствие собственного нагрева/ и магнитного поля. Максимальный ток датчика Холла ограничен насыщением преобразователя напряжение-ток при 150 мА. Этой величине соот-

ветствует погрешность измерения напряжения датчика Холла 0,2%, обусловленная температурной зависимостью его чувствительности^{/8/}.

Поскольку магнитное поле в соленоиде множителя не превышает 20 мТ, нелинейность датчика Холла и магниторезистивный эффект пренебрежимо малы. Важным источником погрешности является напряжение датчика Холла при отсутствии магнитного поля (U_0), величину которого необходимо довести до минимума.

Максимальная ошибка, определяемая напряжением U_0 , равна:

$$\Delta W_{10} = k_w \cdot U_0 \cdot T/r_2, \quad /18/$$

где U_0 - напряжение датчика Холла в отсутствие магнитного поля при максимальном токе датчика.

Из уравнения /18/ следует, что U_0 необходимо компенсировать до величины меньше чем

$$U_0 \leq \frac{\Delta W_{10}}{k_w} \cdot \frac{r_2}{T}, \quad /19/$$

где ΔW_{10} - допустимая ошибка.

На практике величина U_0 должна быть порядка 10⁻⁶ В, что является причиной невозможности применить аналоговый множитель в виде интегральной схемы.

Линейность и симметричность множителя с датчиком Холла в нашем случае была лучше чем +3%.

г/ Ошибка из-за сдвига фазы

С целью минимизации ошибки из-за сдвига фазы^{/8/} были использованы в качестве интеграторов точные операционные усилители с усилением порядка 10⁶ и с верхним частотным пределом 0,6 МГц.

Фазовая погрешность умножителя определяется главным образом постоянной времени преобразователя напряжение-ток-магнитное поле. Величиной около 5 мс при импульсах тока длиной свыше 1 с можно пренебречь.

Суммарная погрешность и повторяемость показаний джоульметра с двойной интеграцией не превышает $\pm 5\%$.

4. МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ

Калибровка джоульметра с двойной интеграцией производится с помощью активного сопротивления, включенного вместо сверхпроводящего магнита. Поскольку выходное напряжение джоульметра прямо пропорционально потерям энергии на цикл, калибровку можно проводить только в одной точке.

Калибровка состоит из следующих операций:

а. Компенсация индуктивной составляющей напряжения на магните.

Сверхпроводящий магнит и компенсационная катушка соединены способом, показанным на рис.1.

Магнит запитывается треугольным импульсом тока, при котором ожидаются максимальные потери. Входным делителем устанавливается минимальное выходное напряжение входного интегратора.

б. Настройка чувствительности умножителя.

Поскольку преобразователи напряжение-ток умножителя имеют ограниченный динамический диапазон входных напряжений, необходимо настроить их входную чувствительность так, чтобы при максимальных величинах di_s/dt и выходного напряжения входного интегратора не происходило насыщения выходных токов преобразователей.

в. Калибровка активным сопротивлением.

Сверхпроводящий магнит заменяется активным сопротивлением порядка $10^{-6} - 10^{-8}$ Ом, и вместо компенсационной катушки включается сопротивление, равное ее внутреннему сопротивлению /рис.2/. Активное сопротивление питается треугольными импульсами, параметры которых определены соотношением

$$I_{ма} \cdot T_a \leq \frac{2U_{1m} \cdot r_1 \cdot \delta}{R_a}, \quad /20/$$

где U_{1m} - максимальное входное напряжение умножителя, выше которого начинается насыщение, R_a - активное сопротивление и δ, r_1 - параметры, приведенные выше.

Уравнение /20/ определяет величину максимального тока при заданной длине импульса или максимальную длину импульса при заданном токе, чтобы избежать перегрузки умножителя. Калиб-

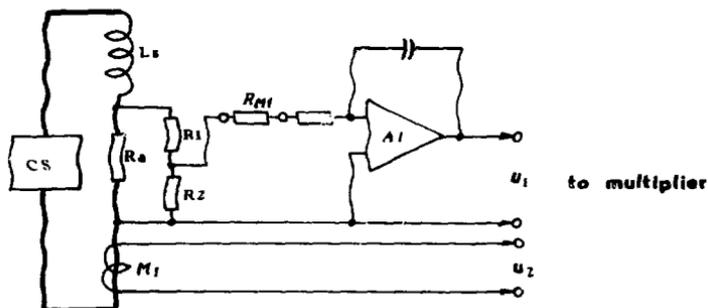


Рис. 2. Калибровка джоульметра активным сопротивлением.

ровку можно проводить при любых величинах $I_m \cdot T < I_{ma} \cdot T_a$. Потери энергии в цикле на активном сопротивлении R_a , запитанном треугольным импульсом тока с параметрами I_m и T , равны:

$$W_{1c} = \frac{1}{3} R_a \cdot I_m^2 \cdot T. \quad /21/$$

Выходное напряжение второго интегратора после импульса тока подстраивается с помощью изменения чувствительности умножителя так, чтобы его величина была равна величине W_{1c} /возможно только уменьшение чувствительности, настроенной по пункту б/.

После описанной процедуры сверхпроводящий магнит и компенсационная катушка соединяются, как показано на рис. 1.

Методика калибровки активным сопротивлением основана на предположении идеального треугольного импульса /ноль-максимум-ноль/. На точность калибровки влияет идеальность формы тока или ненулевой ток в начале и конце импульса. В первом случае можно проверить величину W_{1c} , вычисленную по формуле /21/, методом Вилсона. Точность калибровки джоульметра с двойной интеграцией определена точностью измерения площади гистерезисной петли.

В случае, когда ток в начале и конце импульса не равен нулю, а равен величине I_0 , при калибровке активным сопротивлением возникает дополнительная ошибка:

$$\Delta W_{1co} = -\frac{1}{2} R_a \cdot I_0 \cdot I_m \cdot T. \quad /22/$$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод двойной интеграции, описание и анализ которого были изложены выше, является полезным инструментом для исследования потерь энергии в сверхпроводящих магнитах, а также измерения гистерезисных потерь в коротких образцах.

Анализ погрешности МДИ позволяет определить требования к электронике джоульметра. Описанная методика калибровки является весьма полезной.

В заключение автор выражает благодарность А.Г.Зельдовичу и Е.И.Дьячкову за постоянную поддержку в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brechna H. Superconducting Magnet Systems. Springer-Verlag, 1973, p.244.
2. Wilson M.N. Cryogenics, 1973, 12, p.361.
3. Gilbert W.S., Hinz R.E., Voelker R. UCRL, 1968, 18176.
4. Yamada R., Price M.E., Ishimoto H. Adv.Cryog.Eng., 1977, 22, p.376.
5. Jansak L., Chovanec F. Cryogenics, 1980, 19, p.125.
6. Field W.A. Rev.Sci.Instr., 1965, 36, p.1621.
7. Averichev S.S. et al. JINR, P8-11700, Dubna, 1978.
8. Pinsker A.P. Application of the Semiconductor Hall Generators in Automatization. Gosizdat, Kiev, 1961.
9. Lucas E.J. et al. IEEE Mag. 13, 1977, No.1, p.338.
10. Hlasnik I., Stofanik F., Chovanec F. Res. report P03-561-066, Electrotechnical Institute, Bratislava, 1974.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 октября 1980 года.