

УДК 621.317.4

Н. В. Голышев, С. В. Моторин, Б. М. Рогачевский, А. В. Шабалин

(Новосибирск)

**СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ТЕСЛАМЕТР,  
НЕЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ К НИЗКОЧАСТОТНЫМ  
МАГНИТНЫМ ПОМЕХАМ**

Рассмотрена возможность использования частотозависимой обратной связи в сверхпроводниковом тесламетре как средства борьбы с неоднородными низкочастотными внешними магнитными помехами. Проведен анализ структурной схемы. Получены выражения для определения нижней и верхней частот среза. Результаты эксперимента показали высокую эффективность использования частотозависимой обратной связи в сверхпроводниковом магнитокардиографе.

При использовании сверхпроводниковых тесламетров (СТ) на основе сквидов (сверхпроводниковые квантовые интерференционные датчики) в магнитокардиографии (МКГ) спектральный состав исследуемых сигналов лежит в диапазоне от единиц до сотен герц [1, 2]. Магнитные поля на частотах вне указанного диапазона не несут полезной информации и должны быть подавлены.

Существенно то, что низкочастотные магнитные поля помехи на частотах менее 1 Гц по своему уровню значительно превышают уровни полезных сигналов. Так, например, при снятии магнитокардиограмм в условиях городской клиники мы наблюдали минимальную перегрузку магнитокардиографа из-за магнитных помех от проходящего вблизи городского транспорта примерно в 10—20 раз. Нормальный режим работы магнитокардиографа при наличии такой мощной неоднородной магнитной помехи нарушался. После этого необходимо было осуществлять начальную установку прибора и ждать, пока закончится переходный процесс. Особенности построения схемы СТ по принципу МДМ-усилителя (сквид является его составной частью) не позволяют включить фильтр высоких частот в прямой тракт передачи СТ. Из-за больших помех и возникающих при этом перегрузок прибора измерения приходится проводить на пределах с малой чувствительностью, что приводит к ухудшению шумовых характеристик прибора вследствие возрастающего вклада шумов элементов, стоящих после основного тракта преобразования СТ.

В настоящей работе предлагается использовать частотозависимую обратную связь (ЧОС), которая обеспечивает подавление низкочастотных помех без отмеченных недостатков.

Анализ. Структурная схема СТ, в которой выделены передаточные звенья цепей прямой передачи и обратной связи, приведена на рис. 1. Учитывая, что введение ЧОС возможно как в сквидах с высокочастотной накачкой, так и в сквидах постоянного тока, входную цепь сквида изобразим обобщенно в виде сверхпроводникового квантового интерферометра (СКИ) и катушки обратной связи  $L$ , индуктивно связанной со СКИ. На рисунке:  $\Phi_x$  — измеряемый магнитный поток;  $\Delta\Phi$  — магнитный поток ошибки слежения;  $M$  — коэффициент взаимной индуктивности между СКИ и  $L$ ;  $U_{\text{вых}}$  — выходное напряжение СТ;

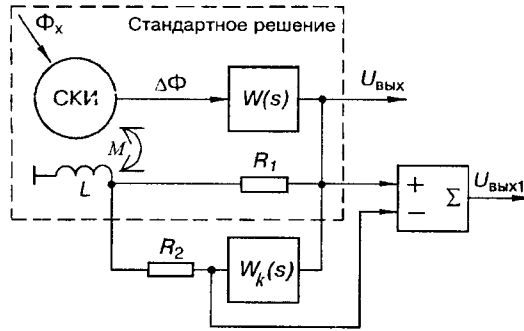


Рис. 1

$U_{\text{вых1}}$  — выходное напряжение сумматора;  $W(s) = \omega_0/s$  — передаточная функция СТ с разомкнутой цепью обратной связи;  $\omega_0$  — частота среза СТ по уровню 0,707;  $s$  — переменная Лапласа;  $K_{\text{ОС}} = M/R_1$  — передаточная функция цепи обратной связи СТ без ЧОС.

Для реализации СТ ЧОС в схему введены корректирующие резистор  $R_2$  и звено с передаточной функцией  $W_k(s) = \omega_t/(\omega_t + s)$ ,  $\omega_t$  — частота среза корректирующего звена по уровню 0,707.

Передаточная функция сверхпроводникового тесламетра (стандартное решение, см. рис. 1, пунктирная линия), охваченного частотозависимой обратной связью, в этом случае для  $U_{\text{вых}}$  имеет вид

$$H(s) = \frac{\omega_0(\omega_t + s)}{K_{\text{ОС}}[(\omega_0 + s)(\omega_t + s) + \omega_0\omega_t N]}, \quad (1)$$

а АЧХ —

$$H(\Omega, N) = \frac{1}{K_{\text{ОС}}} \left[ \frac{1 + \Omega^2 \eta^2}{(1 + N - \Omega^2 \eta^2)^2 + \Omega^2 (1 + \eta)^2} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\Omega = \omega/\omega_0$ ,  $\eta = \omega_0/\omega_t$ ,  $N = R_1/R_2$ .

Исследование характера зависимости (2) показывает, что при  $\Omega = 0$  чувствительность к постоянному магнитному потоку меньше, чем в СТ без ЧОС, в  $(1 + N)$  раз и стремится к уровню, соответствующему СТ без ЧОС при повышении частоты.

Для определения нижней  $\Omega_{\text{н}}$  и верхней  $\Omega_{\text{в}}$  частот среза АЧХ по уровню 0,707 решим уравнение  $2[H(\Omega, N)K_{\text{ОС}}]^2 = 1$ . Учитывая, что для эффективного подавления низкочастотных помех необходимо выполнение условия  $\eta \gg \gg N \gg 1$ , получаем

$$\Omega_{\text{н}} \approx \frac{((1 + N^2) - 2)^{1/2}}{\eta}; \quad \Omega_{\text{в}} \approx \left(1 + \frac{2(1 + N)}{\eta}\right)^{1/2}. \quad (3)$$

Передаточная функция  $H(\Omega, N)$  имеет максимум на частоте

$$\Omega_{\text{max}} \approx \left(\frac{N}{\eta}\right)^{1/2}. \quad (4)$$

Для полного исключения постоянной составляющей на выходе СТ с сохранением преимуществ, которые дает ЧОС, в качестве выходного напряжения необходимо использовать сигнал  $U_{\text{вых1}}$  с выхода сумматора (см. рис. 1). АЧХ в этом случае примет вид:

$$H_1(\Omega, N) = \frac{1}{K_{\text{ОС}}} \frac{\Omega\eta}{\sqrt{(1+N-\Omega^2\eta)^2 + \Omega^2(1+\eta)^2}}. \quad (5)$$

Из (5) видно, что по сравнению с (2)  $H_1(0) = 0$ .

**Эксперимент.** Для экспериментальной проверки полученных результатов в схему СТ в соответствии с рис. 1 было введено корректирующее звено, реализующее передаточную функцию RC-цепи с большой постоянной времени [3]. Для работы СТ на чувствительном пределе обычно достаточно иметь  $N$  порядка 50. Тогда при  $C = 1$  мкФ получим  $f_n \cong 0,1-0,3$  Гц, что вполне достаточно для магнитокардиографических и магнитоэнцефалографических исследований [4]. Для проверки уровня подавления низкочастотных магнитных помех создавался контрольный сигнал на частоте 0,01 Гц от рамки с током. Степень подавления определялась как отношение выходного сигнала СТ с ЧОС к выходному сигналу СТ без ЧОС на частоте контрольного сигнала. При изменении  $N$  от 10 до 50 экспериментальные данные отличались от расчетных не более чем  $\pm 2\%$ , что дает приемлемую для практических расчетов точность.

Введение ЧОС позволило устранить перегрузку магнитокардиографа. При этом в течение 12 ч (дневной цикл работы) не было зарегистрировано ни одного нарушения работоспособности магнитокардиографа. На рис. 2 изображена магнитокардиограмма, полученная с применением ЧОС при воздействии мощной низкочастотной неоднородной помехи (здесь 1 — выход СТ без ЧОС при наличии мощной низкочастотной помехи в отсутствие кардиосигнала; 2 — выход СТ с включенной ЧОС в отсутствие кардиосигнала; 3 — выход СТ с включенной ЧОС при наличии мощной низкочастотной помехи и кардиосигнала).

Следует отметить, что введение ЧОС позволяет в ряде случаев отказаться от цепи смещения, компенсирующей замороженный в сквиде магнитный поток, так как обеспечивает значительную глубину ОС на частотах менее 0,1 Гц. При этом осуществляется согласование по диапазону измеряемого сигнала и сигнала помехи, устраняется необходимость осуществления принудительного сброса СТ. Это не только упрощает схемное решение СТ и алгоритмы обработки выходных сигналов, но и уменьшает влияние этой цепи на дрейф нуля СТ.

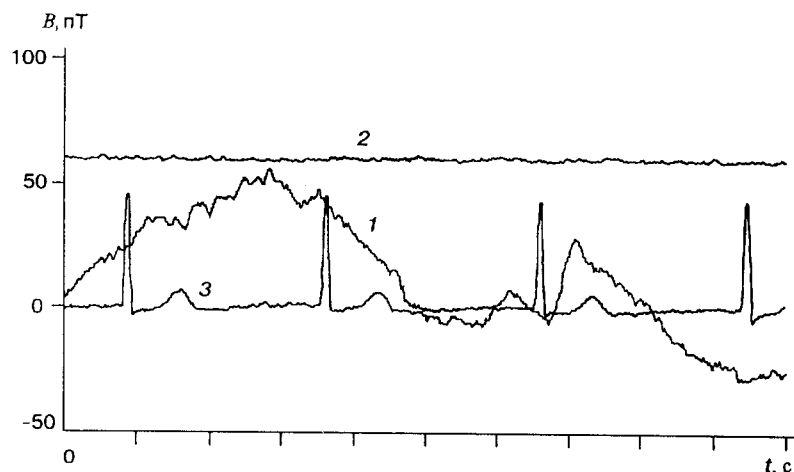


Рис. 2

Таким образом, ЧОС эффективно подавляет НЧ-помехи и в совокупности с методом электронной компенсации позволяет успешно эксплуатировать магнитокардиограф в реальных клинических условиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Введенский В. Л., Ожогин В. И. Сверхслабая магнитометрия и биомагнетизм. М.: Наука, 1986.
2. Слабая сверхпроводимость (квантовые интерферометры и их применение): Пер. с англ. /Под ред. В. В. Шмидта. М.: Мир, 1980.
3. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Пер. с англ. /Под ред. А. Г. Алексеевко. М.: Мир, 1982.
4. Оденгал М. Некоторые нестандартные применения квантовых интерферометров // Физика низких температур. 1985. 11, № 1.

*Поступила в редакцию 14 ноября 1995 г.*

---