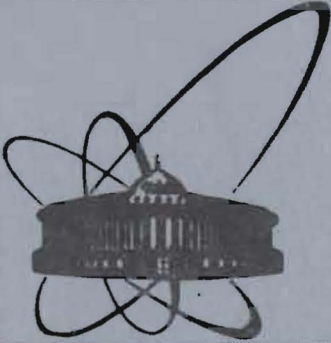


85-20



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-85-20

В.Ф.Бобраков, Б.В.Васильев

СКВИД-ИНТЕРФЕРОМЕТР

Направлено в журнал
"Радиотехника и электроника"

1985

В настоящее время СКВИДы находят все более широкое применение в качестве усилителей низкочастотных электромагнитных сигналов с предельно низким уровнем собственных шумов, уровень которых обычно меньше уровня шумов источников сигналов или внешних помех. В связи с этим представляет большой интерес разработка такого СКВИДа-интерферометра, который являлся бы надежным и удобным в применении лабораторным прибором с характеристиками, оптимальными для большинства приложений. В настоящей работе описан интерферометр, который, по нашему мнению, удовлетворяет вышеизложенным требованиям.

При разработке интерферометра мы руководствовались следующими соображениями:

- входным сигналом для СКВИДа является магнитный поток Φ_0 ;
- отклик СКВИДа на приложенный магнитный поток есть периодическая функция с периодом $\Phi_0 = h/2e = 2,05 \cdot 10^{-15}$ Вб;
- основным показателем качества СКВИДа является его входная энергетическая чувствительность $S_{\Phi}/(2L k^2)$ - величина спектральной плотности мощности шумов, приведенная по входной катушке; эта величина определяет минимальное изменение энергии во входной цепи, которое можно измерить СКВИДОМ в полосе 1 Гц. Входная чувствительность определяется спектральной плотностью мощности шумового потока S_{Φ} , индуктивностью СКВИДа L_s и коэффициентом связи входной катушки со СКВИДОМ k ;
- спектральная мощность шумового потока определяет, как будет показано ниже, не только энергетическую чувствительность, но и другие важные характеристики СКВИДа-интерферометра, такие, как максимальная полоса пропускания малого сигнала и максимальная скорость нарастания входного потока $d\Phi_0/dt$.

На рис.1 изображена блок-схема интерферометра. Прибор работает по принципу нуль-детектора с переносом спектра сигнала на поднесущую частоту 60 кГц^{1/1}. СКВИД и индуктивно связанные с ним входная катушка и катушка колебательного контура располагаются при температуре 4,2 К в гелиевом криостате. Сигнал с датчика считывается маломощным усилителем-автогенератором 1^{1/2}, находящимся при комнатной температуре.

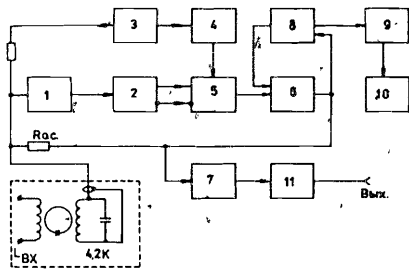


Рис.1. Блок-схема интерферометра.

Модуляция потока осуществляется сигналом, прямоугольной формы, вырабатываемым генератором 3. Фазовращатель 4 компенсирует фазовый сдвиг, возникающий при работе с кабелем большой длины. Дальнейшее усиление осуществляется усилителем низкой частоты 2. УНЧ имеет инвертирующий и неинвертирующий выходы, амплитуда сигнала на его выходе: $10 \div 12$ В.

Демодуляцию сигнала осуществляет синхронный детектор 5. Входное напряжение детектора, пропорциональное сигналу ошибки в петле обратной связи, интегрируется и используется для компенсации входного потока Φ_0 путем подачи компенсирующего тока в катушку контура. Система счета квантов 8 обнуляет интегратор при $U_{\text{вых}} = 5$ В, при этом в реверсивный десятичный счетчик 9 поступает сигнал +1 или -1. Показания счетчика высвечиваются на 5-разрядном светодиодном индикаторе 10.

Выходной сигнал интерферометра снимается с выхода интегрирующей схемы 6 и, при необходимости, подвергается дополнительной фильтрации при помощи синхронного режекторного фильтра 7, эффективно подавляющего помехи на частоте сети и ее гармониках ^{3/}. Фильтр нижних частот 11 с переключаемой частотой среза позволяет привести в соответствие полосу пропускания интерферометра и спектр измеряемого сигнала.

Для расчета оптимальных параметров интерферометра необходимо прежде всего определить величину спектральной плотности мощности шумового потока S_ϕ . Вопрос о шумах СКВИДа неоднократно рассматривался ^{4/}. Отметим лишь, что при индуктивности СКВИДа порядка 10^{-9} Гн и частоте накачки 20 МГц чувствительность интерферометра ограничена шумами предусилителя, находящегося при комнатной температуре, и обычно $S_\phi^{1/2} = 1 \div 2 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$. Добиться существенного уменьшения S_ϕ можно при повышении частоты накачки до 400 МГц и применении очень малошумящего усилителя на охлажденном до 4,2 К полевом транзисторе из арсенида галлия ^{5/}, но при этом интерферометр становится настолько сложным, дорогим и неудобным в эксплуатации прибором, что мы решили остановиться на надежном и предельно простом в эксплуатации предусилителе-автогенераторе, работающем на частоте 18 ± 3 МГц ^{2/}. С таким предусилителем спектральная плотность шумов составляет $1,2 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$.

При разработке интерферометра необходимо реализовать максимальную полосу пропускания малого сигнала f_m . При работе интерферометра в режиме нуль-детектора этот параметр ограничен сверху возникающим из-за влияния шумов явлением скачков потока ^{6/}. СКВИД-интерферометр как нелинейная система с датчиком, имеющим периодический отклик на входное воздействие, может находиться во многих устойчивых состояниях, отличающихся друг от друга на целое число квантов потока Φ_0 . Под воздействием белого шума с нормальным распределением такая система спонтанно переходит из одного устойчивого состояния в другое даже при отсутствии входного сигнала. Со стороны это выглядит как хаотические скач-

ки магнитного потока. Вероятность скачка потока зависит от спектральной плотности мощности шумов S_ϕ и эффективной шумовой полосы системы В, которая определяется малосигнальной полосой пропускания системы:

$$B = \frac{\pi}{2} f_m \quad /1/$$

Средняя частота скачков потока при отсутствии входного сигнала дается формулой ^{7/}:

$$F_c = \frac{4B}{\pi} \cdot e^{-\frac{1}{2\pi^2 S_\phi B}} \quad /2/$$

Если считать допустимой частотой скачков потока 10^{-8} Гц, что соответствует менее, чем одному сбою в год, то при $S_\phi^{1/2} = 1,2 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$, из /2/ следует, что полоса пропускания интерферометра может быть не более $f_m = 45$ кГц.

Наличие на входе системы быстро меняющихся сигналов приводит к резкому увеличению вероятности спонтанных скачков потока, поэтому для интерферометра с $S_\phi^{1/2} = 1,2 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$ оптимальной является $f_m = 20 \div 25$ кГц.

Для реализации такой полосы пропускания необходимо, чтобы частота модуляции потока f_{mod} удовлетворяла условию:

$$f_{\text{mod}} \geq 2f_m \quad /3/$$

Если это условие выполнено, то f_m определяется параметрами интегрирующей схемы 6 /рис.1/ и петлевым коэффициентом усиления интерферометра.

Введем два коэффициента α и β , которые определяют петлевой коэффициент усиления. α - крутизна передачи синхронного детектора: $\alpha = dU/d\Phi$ [В/ Φ_0]. Коэффициент β имеет размерность $\Phi_0/\text{В}$ и определяет изменение потока в СКВИДе при изменении выходного напряжения интегрирующей схемы на 1 В. Коэффициент β изменяется при переключении диапазона измерений и это следует учитывать при расчете постоянной времени интерферометра.

На рис.2 изображены два варианта интегрирующей схемы:

а/ - обычно используемый интегратор /однополюсная коррекция/, б/ - более сложная система, включающая интегратор и пропорционально-интегрирующий усилитель /двухполюсная коррекция ^{7/}/.

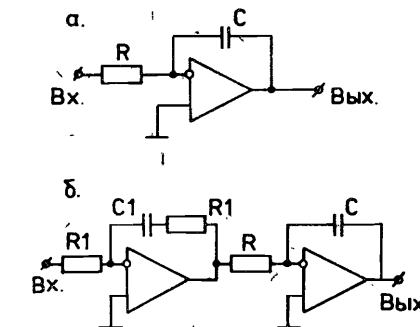


Рис.2. Интегрирующие схемы.

Частота среза интерферометра для обоих случаев определяется:

$$\omega_1 = \frac{a \cdot \beta}{RC} \quad /4/$$

где $\omega_1 = 2\pi f_m$.

Частота ω_2 , ниже которой усиление пропорционально-интегрирующего усилителя начинает расти, определяется формулой:

$$\omega_2 = \frac{1}{R1C1} \quad /5/$$

Для того, чтобы система с двухполюсной коррекцией была устойчивой, необходимо, чтобы выполнялось условие:

$$\omega_2 \leq \omega_1/4. \quad /6/$$

Коэффициенты передачи интегрирующих схем для случаев а/ и б/ равны:

$$K_a = \frac{\omega_1}{i\omega} \quad /7/$$

$$K_b = \frac{\omega_1}{i\omega} \cdot \left(1 + \frac{\omega_2}{i\omega}\right). \quad /8/$$

Отсюда, учитывая, что максимальное выходное напряжение синхронного детектора $U_{max} \approx a/2\pi$, получаем выражения для максимальной скорости нарастания входного потока:

$$a/ \frac{d\Phi}{dt} = f_m \quad /9/$$

$$б/ \frac{d\Phi}{dt} = f_m \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_2}{\omega}\right)^2} \quad /10/$$

Анализ выражений /9/ и /10/ показывает, что для частот, меньших ω_2 , система с двухполюсной коррекцией способна устойчиво работать с сигналами, скорость нарастания которых существенно превышает возможности системы с однополюсной коррекцией. Ввиду столь явного преимущества интегрирующая схема нашего интерферометра построена с использованием принципа двухполюсной коррекции.

Привести в статье полную принципиальную схему интерферометра не представляется возможным, поэтому имеет смысл рассмотреть лишь наиболее важные элементы блок-схемы прибора, которые определяют его основные качественные показатели.

Усилитель-автогенератор подробно описан нами ранее /2/; генератор модуляции, УНЧ и фазовращатель особенностей не имеют, поэтому остановимся более подробно на схеме синхронного детектора и интегрирующей схеме /рис.3/.

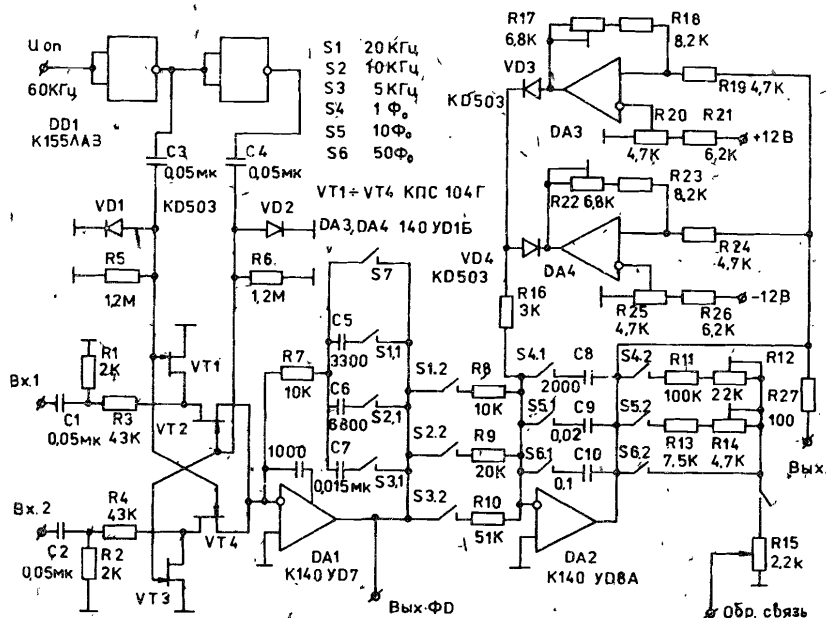


Рис.3. Принципиальная схема синхронного детектора и интегрирующей схемы.

На вх.1 поступает сигнал с УНЧ амплитудой до 10 В. Это входное напряжение преобразуется в ток резистором R3 и далее этот ток коммутируется поочередно включающимися полевыми транзисторами VT1 и VT2. Аналогично работает нижнее плечо синхронного детектора для инверсного входного сигнала. Благодаря такому решению, а также вследствие того, что на инвертирующем входе операционного усилителя DA1 всегда поддерживается близкий к 0 потенциал, синхронный детектор может работать с входными сигналами амплитудой вплоть до напряжения питания +15 В, что обеспечивает малый температурный дрейф напряжения на выходе синхронного детектора /менее 50 мкВ/К/. Соответственно дрейф выходного сигнала интерферометра, обусловленный электроникой, составляет менее $10^{-5} \Phi_0/К$.

Операционный усилитель DA2 преобразует выходной ток синхронного детектора в напряжение, причем в случае, когда S7 замкнут, его частотная характеристика равномерна /однополюсная коррекция/, а когда S7 разомкнут, частотная характеристика имеет подъем 6 дБ/октаву на частотах ниже ω_2 /двухполюсная коррекция/. Частота ω_2 определяется переключателями S4, S5, S6, которые определяют также частоту ω_1 .

Интегратор на ОУ DA2 имеет переключаемые постоянные времени. Конденсаторы C8-C10 включаются в зависимости от выбранной

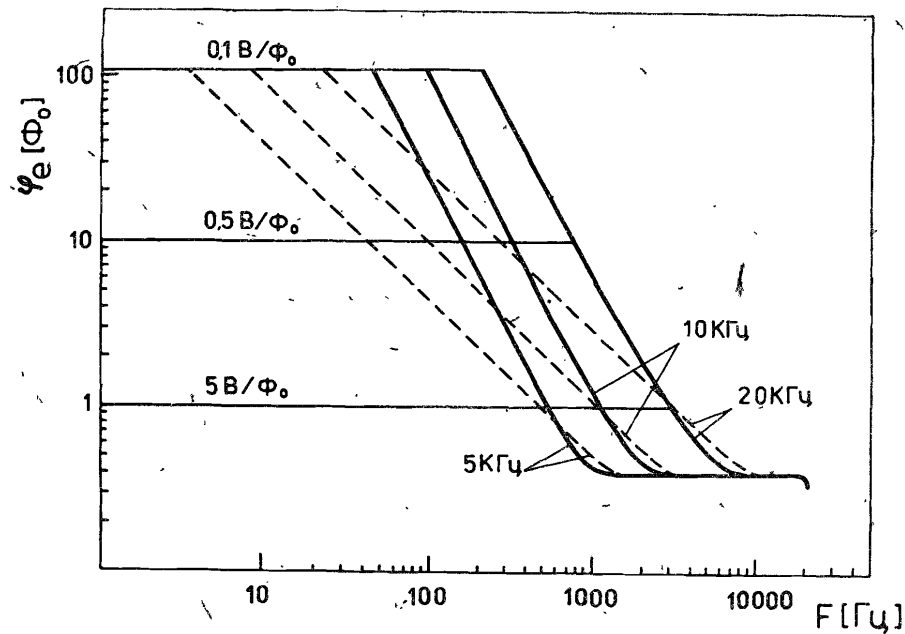


Рис. 4. Зависимость максимальной амплитуды входного потока синусоидальной формы от частоты. Сплошная линия - двухполосная коррекция, пунктирная - однополосная.

частоты ω_1 , резисторы R8 - R10 переключаются для компенсации изменений коэффициента усиления петли обратной связи при переключении диапазона измерений. Диапазон измерений $/1,10$ или $50 \Phi_0/5$ В/ устанавливается переключателями S1 - S3 путем включения соответствующих резисторов в цепь потенциометра регулировки обратной связи R15.

Система сброса интегратора включает два триггера Шмитта на 0.У, DA3 и DA4. При достижении выходным напряжением интегратора уровня +5 В включается триггер на DA3 и сбрасывает интегратор, аналогично работает второй триггер при -5 В. Импульсы с выходов DA3 и DA4 используются для реверсивного счетчика квантов.

- Параметры интерферометра, полученные в результате испытаний:
- СКВИД - двухиндуктивный с $L_s = 5 \cdot 10^{-10}$ Гн;
 - индуктивность входной сверхпроводящей катушки 4 мкГн;
 - энергетическая чувствительность $S_{\phi}/(2L_s k^2) = 10^{-28}$ Дж/Гц;
 - спектральная плотность шумового потока $S_{\phi}^{1/2} = 1,2 \cdot 10^{-4} \Phi_0/\sqrt{\text{Гц}}$;
 - коэффициент преобразования - $5 \text{ В}/\Phi_0$, $0,5 \text{ В}/\Phi_0$, $0,1 \text{ В}/\Phi_0$;
 - полоса пропускания малого сигнала по уровню - 3 дБ: 20 кГц , 10 кГц , 5 кГц ;
 - скорость нарастания входного потока для синусоидального сигнала с частотой 150 Гц - а/ с однополосной коррекцией - $1,4 \cdot 10^4 \Phi_0/\text{с}$, б/ с двухполосной коррекцией - $8 \cdot 10^4 \Phi_0/\text{с}$;
 - диапазон входных сигналов в режиме счета квантов $\pm 10^5 \Phi_0$;
 - частота модуляции потока $f_{\text{mod}} = 60 \text{ кГц}$;
 - дрейф выходного сигнала: менее $10^{-3} \Phi_0/\text{ч}$;
 - полоса пропускания фильтров низкой частоты 2 порядка: 100 ; 50 ; 10 ; 5 ; 1 ; $0,5$; $0,1$; $0,05 \text{ Гц}$;
 - подавление сетевой помехи синхронным фильтром на частоте 50 Гц - 50 дБ , 100 Гц - 40 дБ , 150 Гц - 30 дБ ;
 - графики зависимости максимальной амплитуды входного сигнала от частоты представлены на рис. 4.

Конструктивно интерферометр выполнен в стандарте КАМАК /рис. 5/. Основные узлы прибора, включая все органы регулировок и переключатели режима работы, размещены в трех модулях КАМАК двойной ширины. Предусилитель-автогенератор устанавливается непосредственно на криостате со СКВИДом и соединяется с остальной частью аппаратуры кабелем, который может иметь длину до 30 м .

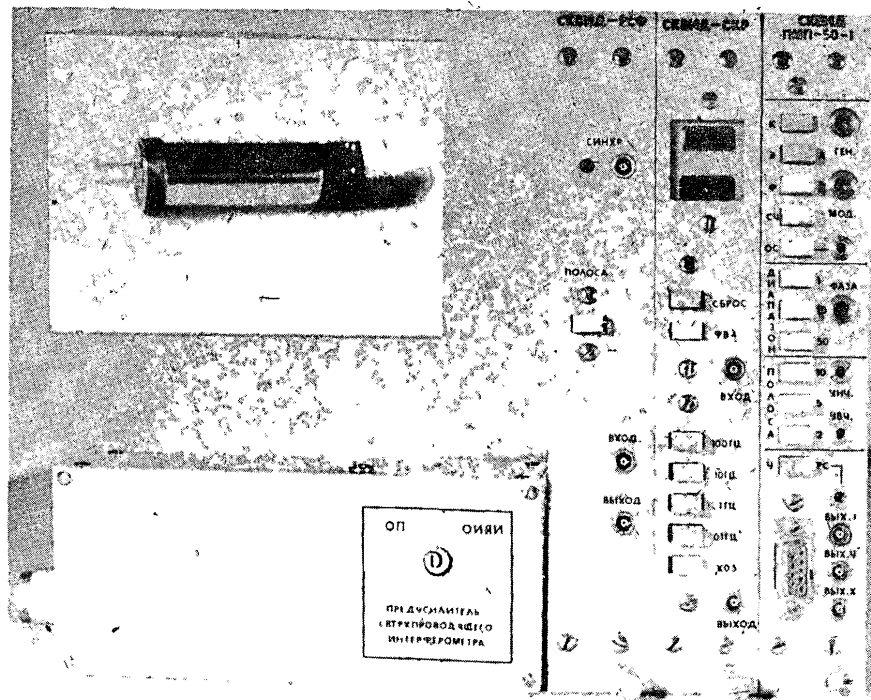


Рис. 5. Общий вид электронных блоков интерферометра. Вверху слева - ампула с датчиком.

На рис.5 показана также ампула со СКВИДОМ. Внутри ампулы находится двухиндуктивный СКВИД с входной сверхпроводящей катушкой индуктивностью 4 мкГн и катушкой из медного провода для связи с колебательным контуром.

Интерферометр используется в экспериментах по измерению слабых магнитных полей, в частности, для обнаружения магнитного монополя Дирака, для измерения электрической поляризации, возникающей в металлах под действием гравитации, а также для магнитной кардиографии. За время испытаний прибор зарекомендовал себя высокочувствительным, надежным и простым в эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Б.В., Лачинов В.Н. ОИЯИ, P13-11691, Дубна, 1978.
2. Бобраков В.Ф., Васильев Б.В. ОИЯИ, P13-80-566, Дубна, 1980.
3. Бобраков В.Ф., Фодель В. ОИЯИ, P13-82-801, Дубна, 1982.
4. Kurkijarvi J. Phys.Rev., 1972, B6, p.832-835.
5. Long A.P., Clark T.D., Prance R.J. Rev.Sci.Instr., 1980, 51(1).
6. Pierce J.M., Opter J.E., Rorden L.H. IEEE Trans.Mag., 1974, MAG-10, p.599-602.
7. Giffard R.P. In: "SQUID-80 Superconducting Quantum Interference Devices and their Applications. de Gruyter, Berlin, 1980, p.445-471.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 января 1985 года.

Бобраков В.Ф., Васильев Б.В.
СКВИД-интерферометр

P13-85-20

Описан квантовый сверхпроводящий интерферометр, работающий с частотой накачки 18 МГц. Достигнуто разрешение по энергии 10^{-28} Дж/Гц. Устойчивая работа прибора с быстро изменяющимися входными сигналами обеспечивается применением двухполюсной коррекции в системе обратной связи. Электронные блоки интерферометра выполнены в стандарте КАМАК.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод Т.Ф.Дроздовой

Bobračov V.F., Vasiliev B.V.
SQUID-Interferometer

P13-85-20

A quantum superconducting interferometer with a bias frequency of 18 MHz is described. An energy resolution of 10^{-28} J/Hz is achieved. The stable operation of the device in the presence of fast changing input signals is provided with a two-pole correction in a feedback loop. The electronics of the device is in CAMAC standard.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1985