

11691

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С3930
В-191

P13 - 11691

Б.В.Васильев, В.М.Лачинов

4528/2-78

КВАНТОВЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТР

1978

P13 - 11691

Б.В.Васильев, В.М.Лачинов

КВАНТОВЫЙ СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ
ИНТЕРФЕРОМЕТР



Васильев Б.В., Лачинов В.М.

Р13 - 11691

Квантовый сверхпроводящий интерферометр

Рассмотрен принцип действия и основные вопросы схемотехники квантовых сверхпроводящих интерферометров. Описаны блок-схема и принципиальная схема прибора, разработанного в ОИЯИ.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики и Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

© 1978 Объединенный институт ядерных исследований Дубна

ВВЕДЕНИЕ

Квантовый сверхпроводящий интерферометр /КСИ/ в настоящее время является одним из наиболее чувствительных приборов, измеряющих магнитные поля, а также электрические токи и напряжения малой мощности. Интерферометр может быть использован как веберметр с чувствительностью к магнитному потоку до 10^{-19} Вб при постоянной времени, равной 1 с, как вольтметр с чувствительностью 10^{-14} - 10^{-15} В при входном сопротивлении 10^{-6} - 10^{-8} Ом и постоянной времени 1 с, как магнитометр-градиентометр с разрешением порядка 10^{-17} Т/м, как пикоамперметр, как чувствительный термометр низких и сверхнизких температур, а также может найти применение в других магнитных и электрических измерениях, где требуется высокая чувствительность при малой мощности сигнала.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И БЛОК-СХЕМА ПРИБОРА

Чувствительным элементом КСИ является сверхпроводящий квантовый интерферометрический датчик /сквид/. Принципы, лежащие в основе работы сквидов, подробно описаны в^{1,2/}. Цель настоящей работы сводится в основном к детальному описанию радиочастотного тракта и схемотехники интерферометра, разработанного в ОИЯИ.

В данном интерферометре применялись одноконтактные сквиды различных типов - одноиндуктивные, предназначенные для измерений магнитных потоков и полей, подобные описанным в^{1/} двухиндуктивные, чувствительные к градиентам магнитных полей, аналогичные описанным в^{3,4/}, многоиндуктивные, подобные описанным в^{5/}, а также резистивные, предназначенные для измерений электрических напряжений^{6/}.

Джозефсоновский контакт во всех типах сквидов был точечным и формировался с помощью двух специально заточенных винтов из ниобия^{3,4/}. Одно-, двухиндуктивные и резистивные сквиды представляли собой ниобиевые детали объемом примерно 1 см^3 /рис. 1/. Эффективная площадь, определявшая чувствительность, для одно- и двухиндуктивных сквидов равнялась примерно $3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$, и потому их разрешающая способность была порядка $5 \cdot 10^{-10} \text{ Тл/квант}$ потока. Многоиндуктивные сквиды имели объем около 100 см^3 и примерно в 20 раз большую разрешающую способность и чувствительность.

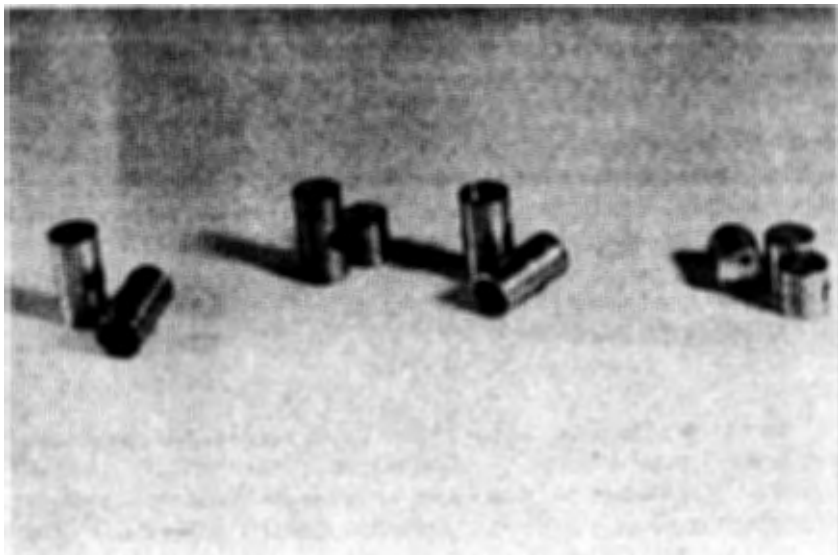


Рис. 1. Одно-, двухиндуктивные и резистивные /справа/ сквиды.

Сквиды всех перечисленных типов не боялись тепловых ударов и выдерживали многократные циклы охладений до гелиевой температуры, нагрева - до комнатной, а также были механически прочны.

При измерениях сквиды помещались в специальную ампулу на нижнем конце измерительной штанги, погруженной в криостат с жидким гелием. К другому концу штанги через коаксиальный разъем присоединялся измерительный блок, включающий в себя радиочастотный тракт интерферометра /рис. 2-4/.

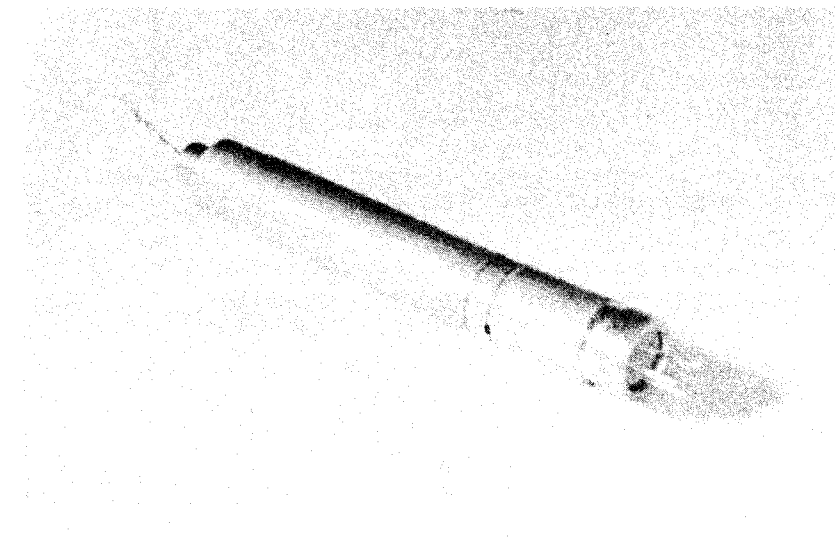


Рис. 2. Ампула со сквидом. Видны выводы сверхпроводящего трансформатора и разъемы для подсоединения к штанге.

Измерения показаний сквидов, зависящих от приложенного магнитного поля или электрического напряжения, осуществлялись с помощью высокочастотного колебательного контура.

Катушка индуктивности этого контура наматывалась сверхпроводящим проводом, рабочая емкость контура была размещена вблизи сквида при гелиевой температу-



Рис. 3. Усилительный блок интерферометра, штанга интерферометра и блок питания.

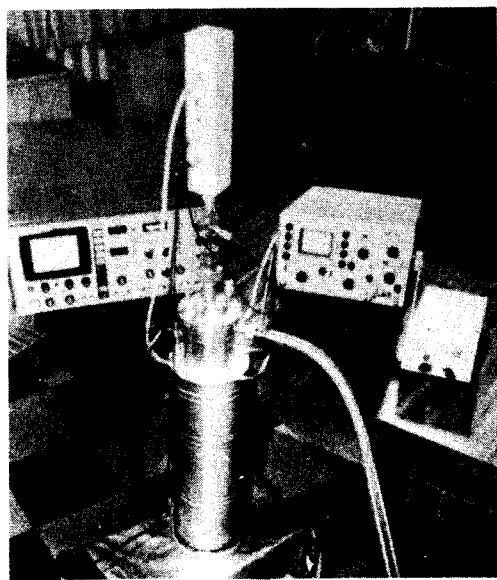


Рис. 4. КСИ в рабочем режиме.

ре, в результате чего добротность контура получалась довольно высокой - несколько выше 10^3 , при рабочей частоте, обычно близкой к 10 МГц. Связь контура со сквидом подбиралась так, чтобы выполнить условие получения максимального сигнала $k^2 Q = 1^{7/}$. Контур соединялся с усилителем высокой частоты /УВЧ/ с полосой $8-12$ МГц через конденсатор $100-200$ пФ, также размещенный в гелиевой ванне. В рабочем режиме радиочастотное поле контура наводит в сквиде циркулирующие токи, величина которых зависит от приложенного магнитного поля и, таким образом, как бы опрашивает сквид. В результате величина радиочастотного напряжения на контуре определяется состоянием сквида и является функцией приложенного к сквиду магнитного потока. Радиочастотная накачка контура в такой системе может быть осуществлена двумя путями - с помощью внешнего генератора, настроенного на резонанс с контуром, или автодинно, возбуждением в системе контур-УВЧ автоколебательного режима. Второй способ оказывается предпочтительней - он позволяет не только упростить схему, но и избавиться от дополнительного источника нестабильности КСИ. Существование, что возбуждение автогенераторного режима в такой системе несложно, так как контур имеет высокую добротность, и возникновение скачков в сквиде^{8/} обуславливает автоматический режим ограничения амплитуды колебаний на уровне, необходимом для нормальной работы интерферометра. Формирование сигнала КСИ в режиме с внешней накачкой и в автогенераторном режиме обладает своими особенностями.

Настройка коэффициента усиления УВЧ, необходимая для возникновения устойчивого автогенераторного режима в КСИ, осуществляется плавной регулировкой режима питания входного каскада УВЧ /рис. 5/.

Для получения информации о приложенном к сквиду магнитном потоке достаточно напряжение с выхода УВЧ продетектировать и, соответствующим образом усилив, подать, например, на осциллограф. Однако для получения линейной характеристики прибора в значительном динамическом диапазоне и для исключения влияния шумов типа $1/f$ усилителя в описываемом интерферометре

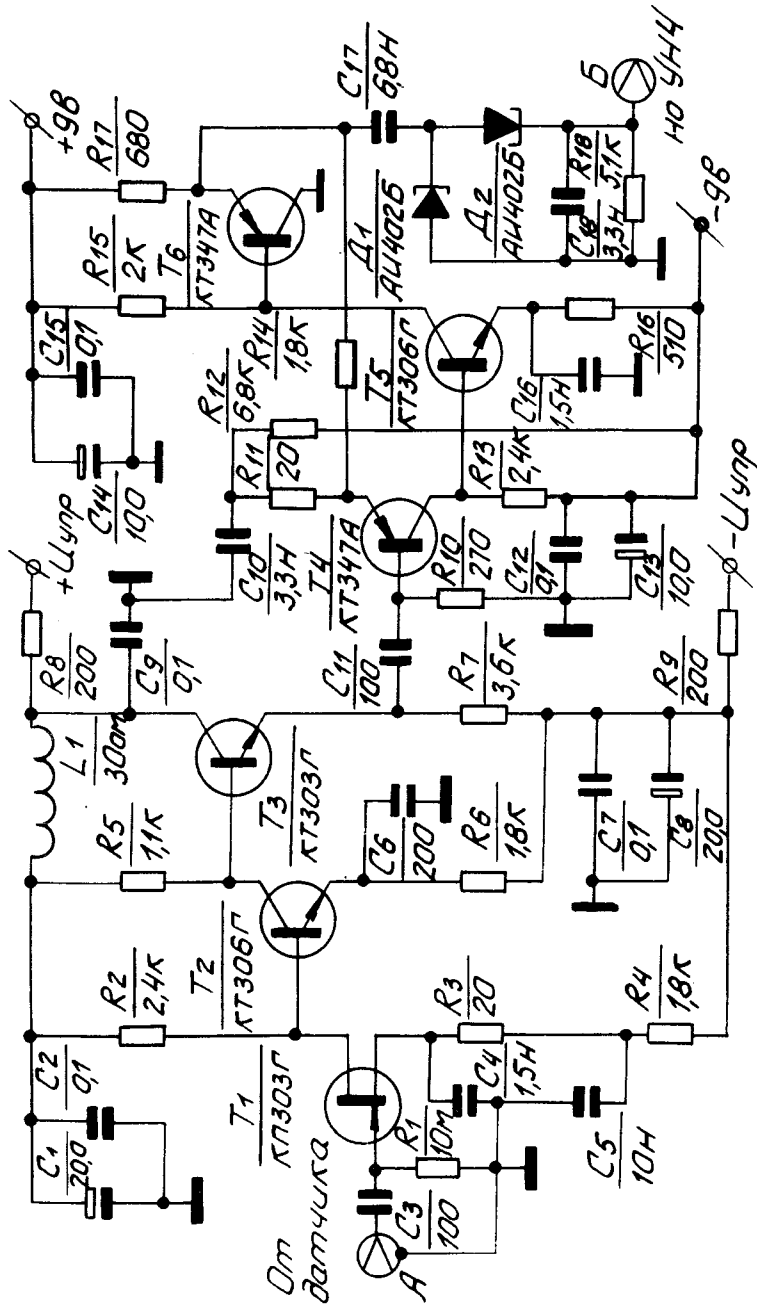


Рис. 5. Принципиальная схема УВЧ и амплитудного детектора интерферометра.

применен радиочастотный тракт более сложной конструкции /рис.6/. В используемой схеме магнитное поле на сквиде с помощью специального генератора модулируется с частотой 1 кГц и амплитудой, близкой к кванту потока. В результате на детекторе УВЧ на выходе последующего усилителя низкой частоты /УНЧ/ существуют непрерывные колебания напряжения с частотой модуляции, амплитуда и фаза которых зависят от постоянного магнитного поля, приложенного к сквиду. Так как вольт-эрстедная характеристика сквида имеет вид треугольной "пилы", присутствие синусоидально модулированного потока на сквиде ведет к появлению на выходе УВЧ напряжения, имеющего только четные гармоники модуляционной частоты, если постоянный магнитный поток на сквиде кратен полуцелому числу квантов потока Φ_0 . Отклонение приложенного постоянного потока от этих значений приводит к появлению сигнала на первой гармонике, фаза которого зависит от того, произошло ли увеличение или уменьшение магнитного потока по отношению к ближайшему полуцелому числу квантов потока Φ_0 . Такое поведение сигнала обуславливает построение измерительной схемы - если с выхода УВЧ напряжение сигнала подать на синхронный детектор, опорным напряжением для которого служит выходное напряжение генератора модуляции, то на его выходе будет существовать постоянное напряжение, величина и знак которого определяются величиной и знаком отклонения приложенного к сквиду магнитного потока от ближайшего полуцелого числа квантов. Включение на выход синхронного детектора интегратора и замыкание отрицательной обратной связи /ООС/ - соединение выхода интегратора с катушкой, создающей магнитный поток на сквиде, позволяет получить КСИ, работающий в схеме нуль-прибора, линейность показаний которого определяется постоянством рабочей точки, а динамический диапазон - коэффициентом ООС. Выходным сигналом в данном случае является напряжение на выходе интегратора, которое, как и во всех схемах нуль-приборов, нечувствительно к небольшим изменениям параметров радиочастотного тракта, в том числе связанным с колебаниями температуры.

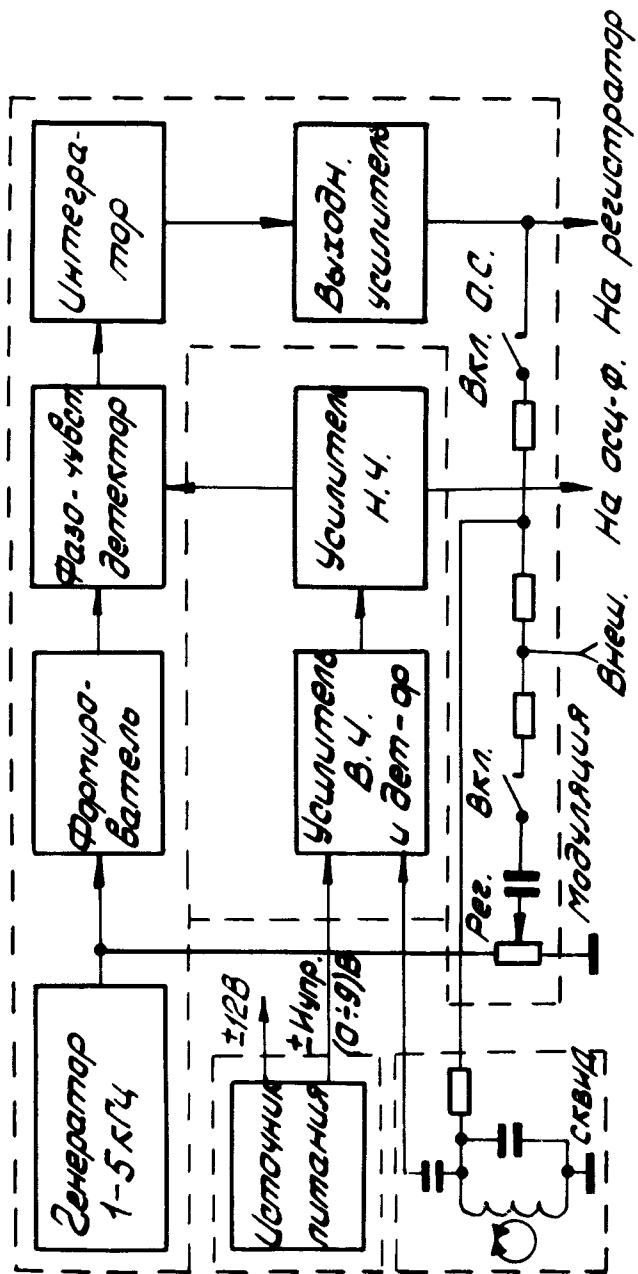


Рис. 6. Блок-схема квантового сверхпроводящего интерферометра /КСИ/.

Так как измерения в такой схеме фактически ведутся на частоте модуляции, вклад шумов типа $1/f$ схемы сильно ослаблен, по сравнению со случаем прямого измерения сигнала постоянного тока на выходе УНЧ, что является главным достоинством данной схемы.

В описываемой схеме модуляционная частота была выбрана равной, примерно, 1 кГц, в связи с тем, что сигналы с более высокой частотой ограничиваются полосой пропускания высокодобротного контура. Постоянные времена интегрирования могли быть выбраны равными 0,02 с и 1 с, а динамический диапазон КСИ составлял, примерно, $\pm 10 \Phi_0$ при разрешении не хуже $10^{-3} \Phi_0 / \text{Гц}$ и мог быть существенно увеличен с пропорциональным ухудшением разрешения.

УВЧ И АМПЛИТУДНЫЙ ДЕТЕКТОР

На рис. 5 представлена схема УВЧ и амплитудного детектора. УВЧ усиливает напряжение на контуре до уровня, необходимого для нормальной работы амплитудного детектора с обеспечением хороших шумовых характеристик. Для обеспечения автогенераторного режима необходимо, чтобы усилитель обладал плавной зависимостью коэффициента усиления от напряжения питания, а вся схема - "мягкой" характеристикой возбуждения.

Так как уровень сигнала на контуре достигает, примерно, сотни микровольт, то коэффициент усиления УВЧ выбран равным 10^3 и обеспечивается тремя каскадами на транзисторах $T_1 - T_6$. Все каскады по постоянному току стабилизированы и хорошо развязаны по питанию. Входной каскад выполнен на полевом транзисторе T_1 /КП303Г/ с малым коэффициентом шума и повышенной крутизной. Снижению уровня шумов также способствует высокое сопротивление в цепи затвора T_1 , заземление его стока и сужение полосы пропускания УВЧ до 4 МГц. Как показала экспериментальная проверка^{10/}, основной вклад в шумы КСИ вносит сквид.

Автодинный режим КСИ обеспечивается высоким коэффициентом усиления усилителя, конструкцией УВЧ и высокой добротностью колебательного контура. Настройка

автодина на оптимальный режим проводится с помощью плавной регулировки питания входного каскада УВЧ. Напряжение питания $\pm U_{упр}$ изменяется в пределах $0 \pm 9 В$ двумя потенциометрами R_{15}, R_{17} /рис. 8/, расположенными в отдельном блоке питания.

Амплитудный детектор сигнала с датчика выполнен на двух обращенных диодах D_1 и D_2 /АИ402Б, рис. 5/. Он обеспечивает высокое качество детектирования сигналов в диапазоне амплитуд несущей частоты от десятка мВ до $0,7 В$ /от пика до пика/. Переменная составляющая сигнала с детектора поступает на УНЧ / $M_2, 1УТ401$, рис. 7/, который повышает уровень сигнала примерно в 50 раз, после чего сигнал подается на фазочувствительный /ФЧ/ детектор и через RC-фильтр / R_{24}, C_9 , рис. 7/ - на контрольный осциллограф.

Схема УВЧ, детектора и УНЧ смонтирована на печатной плате /размером $50 \times 80 мм$ / и установлена во входной экранированной секции измерительного блока /рис. 3/. Со стороны этой секции измерительный блок с помощью коаксиального разъема жестко крепится на измерительной штанге, здесь же находится разъем для подключения модуляции и ООС. На другом конце штанги, который при работе погружается в ванну с жидким гелием, размещается сквид с колебательным контуром и соединительными деталями /рис. 4/.

ГЕНЕРАТОР МОДУЛЯЦИИ

На рис. 7 показана схема внутреннего генератора модуляции, выполненного на операционном усилителе /ОУ/ $M_1, 1УТ401$. В цепи положительной обратной связи генератора используется мост Вина, задающий частоту генератора $1 кГц$. Повышение частоты модуляции способствует увеличению быстродействия КСИ и увеличению отношения сигнал-шум /за счет шумов $1/f$ /, но, с другой стороны, ограничивается полосой пропускания высокооборотного контура. Уровень амплитуды генерации управляется цепью ООС ($R_2 - R_4$). Введение варистора ($R_2, СН1-2-2$) в эту цепь улучшает стабильность амплитуды генерации. Повышение выходной амплитуды сни-

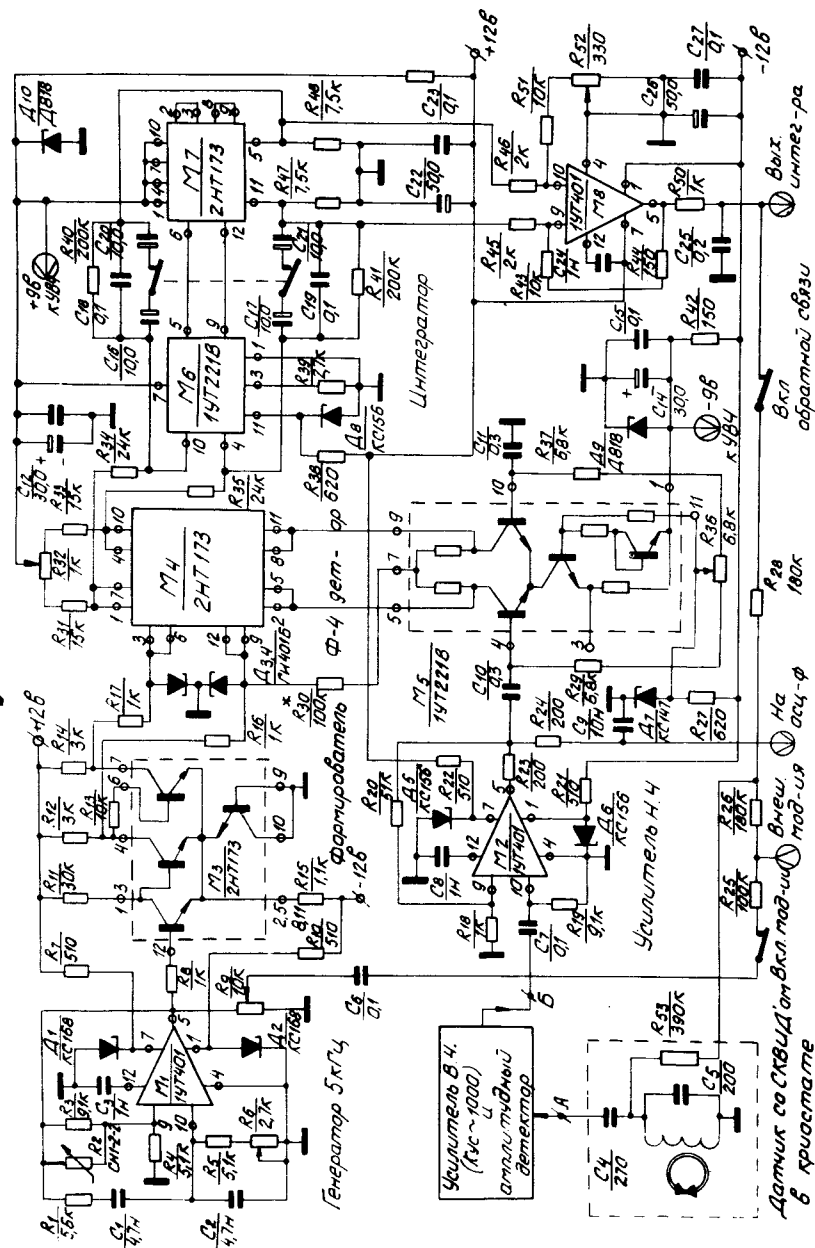


Рис. 7. Принципиальная схема КСИ.

жает сопротивление варистора, а следовательно, снижает и усиление ОУ, что ограничивает нарастание амплитуды. Выходная амплитуда равна 6 В /от пика до пика/ и точно устанавливается с помощью R_6 . Полученное таким образом модуляционное напряжение подается во внешние цепи-с потенциометра R_9 , на формирователь ФЧ-детектора-через сопротивление R_8 .

ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР И ИНТЕГРАТОР

Схема ФЧ-детектора и интегратора представлена на рис. 7. В нее входят: формирователь управляющих прямоугольных импульсов, собственно ФЧ-детектор с интегрирующим усилителем и выходной дифференциальный усилитель /ДУ/. В качестве формирователя прямоугольных управляющих импульсов из синусоидального напряжения модуляции используется триггер Шмидта (M_3) со стабильным порогом срабатывания вблизи 0В с последующим ограничением выходных импульсов по амплитуде на обращенных германиевых диодах D_3 и D_4 /ГИ401Б/. Формирователь обеспечивает два выходных канала с прямым и инверсным сигналами с амплитудой ~0,4 В и длительностью, равной половине периода модуляции.

ФЧ-детектор с транзисторно-ключевой структурой на интегральных и гибридных микросхемах^{11/} обладает малым температурным дрейфом. Транзисторно-аналоговый множитель / M_4 , 2НТ173/ управляется сигналами с формирователя, а детектируемый сигнал поступает на него через ДУ на M_5 /IУТ221В/ в виде парафазных токов.

Аналоговый множитель осуществляет двухтактное детектирование предварительно усиленного входного сигнала. Симметрирование тока в плечах аналогового множителя производится с помощью R_{36} , а выравнивание потенциалов на выходе множителя /как и установка нуля на выходе интегратора/ осуществляется потенциометром R_{32} . Подбором сопротивления R_{30} проводится тонкая коррекция для компенсации пульсации с частотой модуляции на выходе множителя.

В качестве интегрирующего устройства служат последовательно соединенные ДУ на M_6 /IУТ221В/ и повторители на M_7 /2НТ173/ с RC-цепью интегрирующей обратной связи в обоих плечах схемы. Переключением емкостей $C_{16} \div C_{21}$ в RC-цепях выбирается нужная постоянная времени усреднения измеряемого сигнала /0,02 с или 1 с/.

Последующий ОУ на M_8 /IУТ401/($K_{УС} \approx 5$) преобразует дифференциальный сигнал с выхода интегрирующего устройства в однофазный относительно шины "Земля", обеспечивая при отсутствии измеряемого сигнала нуль на выходе. Усилитель также подавляет синфазные составляющие наводок с выхода интегратора. Выход усилителя, имеющий динамический диапазон ~±8 В, удобен для подачи измеряемого сигнала на различные регистраторы, а также в цепь ООС.

Дрейф на выходе ФЧ-устройства менее 0,05% от его динамического диапазона, что соответствует данным работы^{11/} по дрейфу. Коэффициент усиления всего ФЧ-устройства равен ~650 /отношение выходного напряжения к значению входного сигнала от пика до пика в линейной области/. Фазовые искажения сигнала в измерительном тракте малы.

Режим работы КСИ с ООС задается тумблером включения ООС /рис. 7/ и сопротивлениями R_{28} , R_{53} . Выбором величин последних возможно регулировать динамический диапазон КСИ. В приведенном на схеме случае он равен ±10Φ₀.

Схема генератора модуляции и всего ФЧ-устройства смонтирована на плате размерами 50x185 мм² и помещена во вторую секцию измерительного блока. На внешней панели блока /рис. 3 / расположены разъемы типа СР для подключения выходного регистратора, цепи ООС, внешней модуляции и выхода на осциллограф. Кроме того, имеются тумблеры включения ООС и внутренней модуляции, а также ручка регулировки амплитуды модуляции. Измерительный блок соединяется с отдельным источником питания при помощи кабеля через 5-контактный разъем.

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ КСИ

На рис. 8 представлена схема источника питания КСИ. Источник имеет следующие номиналы напряжений питания: $\pm 12 В$ и $\pm U_{упр} / 0 \div 9 В$. Он выполнен на основе выпускаемого ОИЯИ блока питания БС-24 с некоторыми изменениями. Введено сопротивление $R_3 / 30 Ом$, $20 Вт$, чтобы уменьшить нагрев регулирующих транзисторов /ток $250 мА$ / и уменьшить пульсацию выходного напряжения. Результирующие пульсации на выходе БС-24 сделаны меньшими $1 мВ$. Необходимые выходные напряжения получаются с помощью соответствующих цепей со стабилитронами. Стабилитроны D_{11} и D_{12} и сопротивление R_{14} при заземлении их средней точки и установке на выходе БС-24 напряжения $24 В$ обеспечивают получение шин питания $\pm 12 В$ относительно шины "Земля". Стабилитроны D_{13} , D_{14} , Д818Д и сопротивления R_{13} , $R_{15} \div R_{17}$ образуют цепи для получения управляющих напряжений $\pm U_{упр}$ с возможностью регулировки в пределах $0 \div 9 В$.

Источник питания оформлен в виде отдельного блока /рис. 3,4/ с разъемом на задней панели для подключения к измерительному блоку. На его передней панели расположены предохранитель Пр.1, сигнальная лампа L_1 , сетевой тумблер K_1 и ручки регулировки выходных напряжений $\pm U_{упр}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные измерения шумовых параметров описанного КСИ показали^{10/}, что спектральная плотность шумов усилительного тракта, приведенных по входу КСИ, составляет $2,5 \cdot 10^{-5} \Phi_0 / \sqrt{Гц}$, в то время как собственные шумы сквида примерно в четыре раза выше, и в этом смысле описанный тракт можно считать весьма удачным.

Внешний вид КСИ с регистрирующими приборами представлен на рис. 4. Прибор компактен, удобен в работе и может быть использован при решении ряда задач,

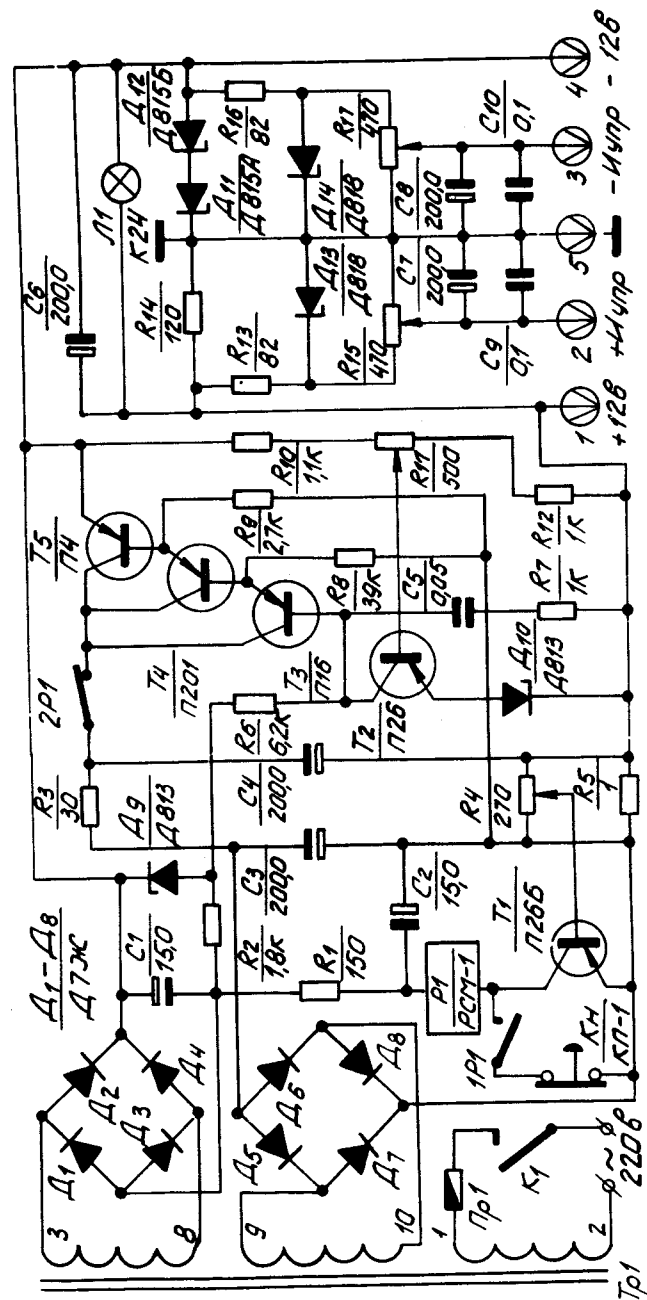


Рис. 8. Принципиальная схема источника питания КСИ.

требующих измерения магнитных полей и их градиентов с высоким разрешением. Было изготовлено несколько подобных интерферометров, которые постоянно применяются в различных экспериментальных работах в ЛНФ ОИЯИ, а также переданы другим организациям.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить А.М.Старикова за монтаж и участие в настройке электронных схем КСИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Silver A.H., Zimmerman J.E. *Appl. Superconductivity* (V.L.Newhouse, ed.), 1975, vol. 1, p.1-112.
2. Лоунасмаа О.В. Принципы и методы получения температур ниже 1 К. "Мир", М., 1977.
3. Zimmerman J.E., Thiene Z., Harding J.T. *J.Appl. Phys.*, 1970, v.41, p.1572.
4. Васильев Б.В., Гребинник В.Г., Симкин В.С. ОИЯИ, P13-6942, Дубна, 1973.
5. Zimmerman J.E. *J.Appl.Phys.*, 1971, v.42, p.4483.
6. Васильев Б.В., Кривой Г.С. ОИЯИ, P13-10957, Дубна, 1977.
7. Васильев Б.В., Иваненко А.И., Трофимов В.Н. *Радиотехника и электроника*, 1975, XX, с.1255.
8. Goodkind J., Stolfa D. *Rev.Sci.Instr.*, 1970, 41, p.799.
9. Васильев Б.В., Данилов В.В., Лихарев К.К. *IEEE Trans. Magn.*, MAG-11, 1975, 743.
10. Васильев Б.В., Горделий В.И. ОИЯИ, P13-11048, Дубна, 1977.
11. Абдурахманов К.П., Котов Б.А. ПТЭ, 1971, №3, с.127.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 июня 1978 года.